

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

SYSTÈME DE DÉTECTION D'OBSTACLES POUR
VÉHICULE MINIER SOUTERRAIN

FARID MELAMED

DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE ET DE GÉNIE INFORMATIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLOME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES (M.Sc.A.)

(GÉNIE ÉLECTRIQUE)

NOVEMBRE 1997



**National Library
of Canada**

**Acquisitions and
Bibliographic Services**

**395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada**

**Bibliothèque nationale
du Canada**

**Acquisitions et
services bibliographiques**

**395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada**

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-33162-8

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE

Ce mémoire intitulé:

SYSTÈME DE DÉTECTION D'OBSTACLES POUR
VÉHICULE MINIER SOUTERRAIN

présenté par: MELAMED Farid

en vue de l'obtention du diplôme de: Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de:

M. HURTEAU Richard, D.Ing., président

M. COHEN Paul, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. POLOTSKI Vladimir, Ph.D., membre et codirecteur de recherche

M. PIOTTE Martin, Ing., membre

Je dédie ce mémoire à ma chère épouse **Yael-Varda BAZIR** pour son soutien et la tendresse qu'elle apporte dans notre foyer et à mes parents pour leur soutien et leur confiance de tous les instants.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Noranda et le CRSNG pour leur soutien financier.

Je tiens aussi à remercier le professeur Paul Cohen mon directeur de recherche, pour m'avoir accepté dans son laboratoire, pour son aide et ses judicieux conseils tout au cours de ce projet de recherche.

Je remercie aussi monsieur Vladimir Polotski mon codirecteur de recherche, pour m'avoir aidé à réaliser ce travail, pour ses conseils et spécialement pour sa patience.

Je désire aussi exprimer mes remerciements au personnel du Centre de Technologie Noranda, et en particulier à monsieur Martin Piotte, pour m'avoir suggéré mon sujet de recherche, pour m'avoir fourni toute l'information de base nécessaire et pour ses commentaires et suggestions utiles.

Je tiens à remercier spécialement monsieur Samuel Flamand pour son aide dans la rédaction de ce mémoire.

Je remercie également les autres membres du Groupe de Recherche en Perception et Robotique de l'École Polytechnique de Montréal, étudiants, assistants de recherche ou professeurs, en particulier le professeur Jean-Yves Hervé, pour leur soutien tout

au long de mes études de maîtrise.

Résumé

Un véhicule autonome qui navigue dans les galeries minières doit être capable d'éviter les collisions avec des obstacles qu'il est susceptible de rencontrer sur son trajet. La géométrie de l'environnement empêchant en général le véhicule de contourner un obstacle, la seule stratégie applicable pour éviter un obstacle sera donc d'immobiliser le véhicule. Une détection sûre et à temps des obstacles revêt une importance primordiale. Les exigences principales d'un système de détection d'obstacles capable d'opérer dans ce genre d'environnement sont: un temps de réaction court, un faible taux de fausses alertes et une détection systématique des obstacles majeurs.

Le système proposé dans ce mémoire utilise un télémètre à lumière structurée composé de trois caméras CCD et de trois diodes laser projetant chacune trois plans de lumière laser sur la scène. L'intersection de ces plans avec les parois, le sol de la galerie et éventuellement avec les obstacles se projette dans l'image des profils lumineux grâce auxquels la géométrie de la scène rencontrée peut être déduite.

Au lieu d'essayer de reconstruire la géométrie 3D de la scène, ce qui est un processus lent et sensible au bruit, nous exploitons directement le contenu de l'image et

en particulier son évolution temporelle afin de détecter la présence d'obstacles. La présence d'un obstacle sur le trajet du véhicule donnera lieu à des transformations dans les profils qui sont incompatibles avec l'hypothèse d'une galerie navigable. La méthodologie que nous proposons prend en compte les phénomènes tels que les irrégularités du sol et des murs de la galerie, les cahots et les perturbations du trajet emprunté par le véhicule et les dégradations des conditions de visibilité.

Abstract

An autonomous vehicle, navigating through mine galleries, must be capable of avoiding collisions with obstacles it may encounter on its path. Since the limited clearance usually prevents the vehicle from moving around the obstacle, the only applicable strategy for obstacle avoidance is therefore to stop the vehicle. Early, reliable detection of obstacles is therefore of primordial importance. The main requirements of an obstacle detection system capable of operating in this environment are: a short reaction time, a low rate of false alarms, and a systematic detection of major obstacles.

The system we propose in this work uses three structured-light range-sensors, each composed of a CCD camera and a laser diode projecting three light planes onto the scene. The intersections of these planes with the walls and floor of the gallery (and eventually with obstacles), project into the image as light profiles, from which the geometry of the observed scene can be inferred.

Rather than attempting to reconstruct the 3D geometry, which is a computationally heavy, noise-sensitive process, we directly exploit the content of the image, and in particular its temporal evolution, to detect the presence of obstacles. Indeed, the

presence of an obstacle on the path of the vehicle will result in transformations of the light profiles that are incompatible with the hypothesis of a navigable gallery. The methodology that we propose takes into account phenomena such as irregularities of the floor and the walls of the gallery, bumps and perturbations on the vehicle's path, and degradations of visibility conditions.

Table des matières

Dédicace	iv
Remerciements	v
Résumé	vii
Abstract	ix
Table des matières	xi
Liste des figures	xv
Liste des tableaux	xx
Liste des notations	xxi
Introduction	1
1 Revue bibliographique	6
1.1 Capteurs de Perception	6

1.1.1	Capteurs de perception optiques passifs	7
1.1.2	Capteurs à lumière structurée	8
1.1.3	Télémètres actifs	11
1.2	Méthodes de détection d'obstacles	13
1.2.1	Systèmes utilisant des senseurs passifs	13
1.2.2	Systèmes utilisant des senseurs actifs	14
1.3	Conclusion	24
2	Description du système proposé	28
2.1	Structure générale	31
2.1.1	Repères	32
2.1.2	Modèle de la caméra	34
2.1.3	Modèle de la source de lumière laser	35
2.2	Conception préliminaire du système	35
2.3	Détection d'obstacles	38
2.3.1	Considérations géométriques	38
2.3.2	Détection dans le plan image	41
2.4	Choix des paramètres de configuration	51
2.4.1	Position et angle d'inclinaison de la source laser	51
2.4.2	Champ de vision de la diode laser	52
2.5	Problèmes de visibilité	53
2.5.1	Régions non visibles	53

2.5.2	Régions occultées	56
2.5.3	Apparence des parois dans l'image	62
2.6	Conclusion	65
3	Système de détection d'obstacles : analyse détaillée	67
3.1	Structure des données	69
3.2	Pré-traitement des images	72
3.2.1	Seuillage et amincissement	72
3.2.2	Échantillonnage et filtrage	75
3.2.3	Érosion	78
3.2.4	Élimination de la partie d'image qui correspond aux parois	78
3.3	Procédure récursive du suivi de la ligne du sol	80
3.4	Suivi d'obstacles	81
3.5	Détection de nouveaux obstacles	86
3.6	Décision	88
3.7	Discussion	89
4	Simulation du système proposé	91
4.1	Environnement	91
4.1.1	Galleries et intersections	92
4.1.2	Relief du sol	92
4.1.3	Obstacles	94

4.2	Véhicule	96
4.2.1	Trajet du véhicule	98
4.3	Système de détection d'obstacles	99
4.3.1	Lasers	100
4.3.2	Caméras	101
4.4	Tests et résultats	102
4.5	Conclusion	118
	Conclusion	120
	Bibliographie	123

Liste des figures

1.1	Exemple d'image d'une scène éclairée par un plan de lumière laser infrarouge.	9
1.2	Principe de calcul de la profondeur par un télémètre à lumière structurée.	10
1.3	Principe de calcul de la profondeur par un télémètre ultrasons	12
1.4	Définition des paramètres de balayage (Kuc et Brashan 1989)	16
1.5	Carte d'environnement reconstruite par l'approche "Just In Time" (Rekleitis et al. 1996)	18
1.6	Carte selon le modèle probabiliste (Moravec et Elfes 1985)	21
1.7	Méthode de correction des cases dans l'approche "par histogramme" (Borenstein et Koren 1991a).	23
1.8	Comparaison entre l'approche "Probabiliste" et l'approche "par histogramme" (Raschke et Borenstein 1990).	24
2.1	Disposition du système proposé.	29
2.2	Disposition de senseur sur le véhicule (sous-système de centre).	30

2.3	Diagramme structurel du système de détection d'obstacles.	30
2.4	Schéma-bloc général du système proposé.	32
2.5	Repères utilisés pour l'analyse du système.	33
2.6	Modèle de la caméra.	35
2.7	Modèle de la source de lumière laser.	36
2.8	Position de la diode laser sur le véhicule.	36
2.9	Cas d'occultation lorsque la diode laser est située au-dessus de la caméra.	37
2.10	Image réelle d'un sol uniformément plat éclairé par un plan laser.	39
2.11	Image réelle d'un sol uniformément plat et d'un obstacle éclairé par un plan laser.	40
2.12	Calcul de h et L	41
2.13	Définition d'une zone de danger (ZD) dans l'image.	42
2.14	Image simulée d'un sol irrégulier.	43
2.15	Image simulée d'un sol irrégulier et d'un obstacle dans le cas d'un basculement du véhicule dû à une roche.	44
2.16	Schéma bloc du suivi de l'obstacle dans l'image.	44
2.17	Principe de recherche du profil du sol en utilisant sa position initiale dans l'image.	46
2.18	Principe de détection des segments détachés.	47
2.19	Principe de suivi des segments détachés.	48
2.20	Profil d'un obstacle large.	49

2.21	Position des plans laser dans le cas d'un basculement du véhicule.	50
2.22	Exemple de région non visible.	54
2.23	Région occultée du système de télémètre gauche.	56
2.24	Solution au problème de région occultée.	57
2.25	Virage simulé.	58
2.26	Description des paramètres pour résoudre le problème des régions oc- cultées.	60
2.27	Apparence d'un obstacle et d'une paroi dans l'image.	62
2.28	Description des paramètres pour le problème d'apparence de parois dans l'image.	63
3.1	Schéma-bloc général du système	68
3.2	Structure de la $Ligne_{ij}$	69
3.3	Description des paramètres de la droite D_{ij}	70
3.4	Exemple des valeurs attribuées aux bits de O_{ij} correspondant à une image d'une ligne laser.	71
3.5	Exemple des valeurs de $y_{C,j}^k, j = 1, 2, 3$	71
3.6	Schéma-bloc du module de pré-traitement d'image.	72
3.7	Problématique pour la ligne laser dans l'image	73
3.8	Méthode d'estimation du centre de la raie laser dans l'image.	74
3.9	Exemple de processus d'amincissement implanté.	75

3.10 Principe de déplacement de la fenêtre dans l'image pour échantillonnage et filtrage.	76
3.11 Succession des étapes de traitement d'une image	79
3.12 Procédure récursive du suivi de la ligne du sol.	80
3.13 Schéma-bloc du module du suivi de la ligne du sol.	81
3.14 Exemples d'estimation de la ligne du sol.	82
3.15 Forme de la fenêtre de recherche pour détecter la position réelle du segment détaché.	84
3.16 Fenêtres de recherche pour la détection de nouveaux obstacles.	87
4.1 Galeries et intersections simulées.	93
4.2 Modélisation d'un accident sous la roue du véhicule.	95
4.3 Modèle du véhicule.	96
4.4 Points de références sur le véhicule	97
4.5 Trajet du véhicule	99
4.6 Disposition du système proposé.	100
4.7 Taux de détection (Cas 1).	105
4.8 Position du véhicule et de l'obstacle dans une galerie rectiligne (Cas 2)	106
4.9 Taux de détection (Cas 2.a).	107
4.10 Taux de détection (Cas 2.b)	107
4.11 Taux de détection (Cas 2.c).	109

4.12 Série d'images consécutives dans le cas où le véhicule passe sur un accident de terrain (Cas 2.c).	110
4.13 Position du véhicule et de l'obstacle dans une galerie curviligne (Cas 3.a).	111
4.14 Taux de détection (Cas 3.a).	111
4.15 Série d'images consécutives lorsque le véhicule se trouve dans une ga- lerie curviligne.	112
4.16 Série d'images consécutives dans le cas où le véhicule exécute un virage important (Cas 3.b).	114
4.17 Position du véhicule et de l'obstacle dans un virage (Cas 2.b).	115
4.18 Taux de détection (Cas 3.b).	115
4.19 Position du véhicule et de l'obstacle dans l'intersection en "T" (Cas 4).	116
4.20 Série d'images consécutives lorsque le véhicule se trouve dans une in- tersection en "T".	117
4.21 Taux de détection (Cas 4).	117

Liste des tableaux

1.1	Capteurs pour détection d'obstacles	26
2.1	NV_{min} et H_t en fonction de α_t	52
3.1	Valeur attribuée au Super-pixel en fonction des positions codées des pixels blancs, dans la fenêtre d'échantillonnage et filtrage.	77
4.1	Résumé des résultats de simulation	118

Liste des notations

- α_l : angle d'inclinaison du laser par rapport à la verticale :
- α_c : angle d'inclinaison de la caméra par rapport à la verticale :
- β : angle d'ouverture de la diode laser :
- f_x : distance focale de la caméra en direction horizontale :
- f_y : distance focale de la caméra en direction verticale :
- h_{min} : hauteur minimale des obstacles à détecter par le système :
- H_c : hauteur à laquelle est placée la caméra :
- H_l : hauteur à laquelle est placé le laser :
- R_c : repère lié au centre optique de la caméra :
- R_i : repère lié au centre du plan d'image ;
- R_l : repère lié au plan laser :
- R_p : repère du plan d'image discrétisé :

- R_r : repère global lié à la route :
- R_v : repère véhicule lié à un point de référence en avant du véhicule :
- N_x : nombre de colonnes de l'écran (pixel) :
- N_y : nombre de lignes de l'écran (pixel) :
- N_{min} : nombre minimum de trames dans lesquelles un même obstacle est observable par un des systèmes :
- W_b : largeur de la bande de sécurité :

Introduction

Un véhicule autonome qui navigue dans les galeries minières doit être capable d'éviter toute collision avec des obstacles pouvant se trouver sur son trajet. Dans le cas simple, d'un véhicule navigant dans un environnement structuré (sol uniforme, parois lisses etc.), il est possible d'utiliser un système de détecteurs de proximité (télémètre). La détection d'obstacles se résume alors à l'interprétation des données provenant de ce télémètre. Par contre, lorsque l'environnement est plus complexe, une simple méthode consistant à "mesurer" n'est plus efficace. Le système devrait alors être capable de différencier entre les obstacles potentiels (roches, véhicules stationnés) et les irrégularités de la scène. Récemment, différents systèmes de guidage automatique devant munir les véhicules miniers ont été proposés (Steele et al. 1993, Arajdal 1996), et testés dans des conditions réelles (Laperrière 1991), mais aucun d'entre eux n'a résolu le problème de détection d'obstacles. Il devient alors nécessaire de concevoir et réaliser un système de détection d'obstacles afin de rendre ces véhicules miniers vraiment autonomes et leur exploitation plus sécuritaire.

Les exigences qu'un tel système doit remplir sont les suivantes :

- **Un temps de réaction court.**

Un véhicule minier souterrain de type chargeuse-navette circule à des vitesses de l'ordre de 15 à 20 km/h. Pour une intervention se situant dans les délais les plus brefs possibles, le système de détection d'obstacles doit prévenir le système de navigation (ou l'opérateur du véhicule) au moins 6 mètres avant l'impact, cette distance étant fonction des capacités de freinage du véhicule et de sa masse.

- **Une détection systématique des obstacles majeurs.**

Plusieurs événements peuvent causer la présence d'un obstacle dans une galerie souterraine. Il peut tout d'abord s'agir d'un bloc de minerai tombé du godet de la chargeuse-navette lors d'un précédent passage. Moins fréquemment, il peut s'agir d'une roche détachée du plafond de la galerie ou d'une paroi. Un obstacle peut aussi consister en un autre véhicule à l'arrêt ou en mouvement, ou même en un humain. Dans le cas d'objets inertes, tout obstacle dont la hauteur est supérieure à 20 cm présente un risque d'endommagement du véhicule. Il doit donc être systématiquement détecté.

- **Un faible taux de fausses alertes.**

Dans les conditions d'opérations propres à une galerie de mine (sol accidenté, parois inégales etc.), le système ne sera pas en mesure de sélectionner d'une façon radicale entre les obstacles supérieurs à 20 cm et ceux de moins de 20 cm. Certains événements ayant une hauteur inférieure à 20 cm seront donc interprétés comme des obstacles. Il faudra toutefois minimiser le nombre de fois où le système déclenche une alarme pour des objets non significatifs.

A partir des considérations précédentes, nous présentons dans cette étude un système pour la détection d'obstacles dans des galeries minières. Il se compose de trois caméras CCD (chaque caméra surveillant une position différente de l'espace en avant du véhicule) et de plusieurs diodes laser opérant en gamme infrarouge et projetant chacune trois plans de lumière cohérente sur le sol à une distance d'environ 8 mètres en avant du véhicule. L'intersection de ces plans avec les objets dans la scène apparaît comme des profils lumineux dans les images prises par les caméras CCD (chaque caméra est équipée d'un filtre infrarouge). Dans le cas général, la présence d'un obstacle devant le véhicule se traduit par l'apparition de discontinuités dans ces profils. Une première étape consiste à distinguer les profils dus aux obstacles de ceux qui sont dus à d'autres événements qui peuvent se trouver dans la scène (parois, sol). Par la suite, l'évolution de ces profils est suivie temporellement (d'une image à l'autre) jusqu'à éventuellement atteindre un point critique et déclencher une alarme. L'avantage de cette méthode réside dans le fait que la reconstruction de géométrie tridimensionnelle de la scène, qui est un processus lent et sensible au bruit, est évité.

La variété des conditions dans lesquelles le système doit opérer rend impossible la réalisation d'un système complètement général. Les suppositions sur l'environnement dans lequel le véhicule doit circuler ainsi que les données dont ce système a besoin pour fonctionner sont les suivantes :

- transversalement, le sol de la galerie est globalement plat, mais peut être doté d'un relief de basse amplitude (ondulations de largeur approximative : 5 cm).

- les conditions générales de prise de vue sont assez favorables pour que les intersections des plans de lumière avec les objets dans la scène puissent être aperçues précisément dans les images prises par les caméras.
- par un système externe (ex. le système de navigation), on peut obtenir de l'information à propos de la vitesse du véhicule, son orientation et la distance entre le véhicule et les parois dans le cas où le véhicule se trouve dans une intersection.

Les objectifs fixés pour la réalisation de ce projet consistent à :

1. Étudier les télémètres les plus employés dans le domaine de la robotique mobile ainsi que les systèmes ayant cours pour la détection d'obstacles, afin de déterminer le senseur le plus approprié dans notre cas.
2. Développer un système autonome de détection d'obstacles qui s'adapte le mieux au milieu minier et qui remplisse les exigences mentionnées précédemment.
3. Étudier les performances du système proposé en analysant son comportement à travers une simulation.

Ce mémoire se divise en quatre chapitres. Le premier chapitre présente une bibliographie générale des systèmes de détection d'obstacles existants. La géométrie du système proposé, son aspect général et le choix de ses paramètres ainsi qu'un aperçu de l'approche utilisée sont discutés dans le chapitre 2. Le chapitre 3 détaille l'algorithme d'analyse d'images ainsi que la prise de décision dans les différentes situations

possibles. La simulation du système, implique la modélisation de l'environnement, la modélisation du véhicule et de son système de vision, et les résultats de cette simulation sont présentés dans le chapitre 4. Enfin, nous finissons ce travail par une conclusion générale.

Chapitre 1

Revue bibliographique

Une partie de ce travail s'inspire de travaux déjà réalisés dans le domaine de détection d'obstacles. Dans ce chapitre est présenté un résumé de travaux publiés dans la littérature scientifique qui ont un lien avec notre recherche.

La section 1.1 présente une revue des systèmes de vision télémétriques couramment utilisés en robotique mobile et la section 1.2 décrit et analyse plusieurs systèmes de détection d'obstacles.

1.1 Capteurs de Perception

L'autonomie d'un robot est limitée par ses capacités de vision. En effet, le robot n'est pas capable de réagir face au monde extérieur s'il ne perçoit pas ses éléments. Celui-ci devrait alors être équipé par des capteurs dont le choix doit dépendre de la tâche à laquelle il est dédié et de l'environnement dans lequel le robot travaille.

Globalement, le rôle d'un système de perception, qui équipe un robot mobile est d'assurer deux fonctions:

- représenter l'environnement pour la navigation ou pour la localisation d'obstacles.
- localiser le robot dans son environnement par l'identification de points de repère connus d'avance ou appris en chemin.

Dans cette section, nous présenterons les types de capteurs optiques utilisés par des systèmes pour assurer les fonctions ci-dessus. On peut diviser ces capteurs en trois classes principales : les capteurs utilisant une ou plusieurs caméras passives, les capteurs semi-actifs à lumière structurée et les télémètres actifs.

1.1.1 Capteurs de perception optiques passifs

L'image acquise par les caméras passives CCD s'apparente à la vision directe d'un opérateur. Le cerveau humain est habitué à interpréter cette image. Néanmoins, il n'en est pas de même pour les algorithmes implantés sur les robots. Malgré les progrès accomplis dans ce domaine, l'interprétation directe des images prises par une caméra CCD est longue alors que dans le cas de détection d'obstacles pour un véhicule en mouvement le temps de traitement doit être très court. De plus, les algorithmes de traitement sont sensibles aux conditions d'observation (contraste, éclairage) ce qui reste difficile à contrôler dans les milieux miniers.

1.1.2 Capteurs à lumière structurée

Ce type de capteur consiste en une caméra CCD munie d'un filtre passe-bande et d'une source de lumière cohérente. Le rôle du filtre passe-bande consiste à isoler l'effet de la source de lumière cohérente sur la scène de l'effet d'autres sources d'éclairage éventuellement présentes. Pour déterminer la structure 3D d'une région de la scène, on projette un patron lumineux spécifique à partir de la source de lumière. L'intersection de ce patron avec la structure locale de la scène produit des profils lumineux dans l'image prise par la caméra (Figure 1.1). Dans le cas d'un système tel qu'illustré à la figure 1.2, la profondeur en chaque point peut être calculée (avec une précision qui dépend de la résolution de la caméra) par triangulation à partir de l'expression suivante :

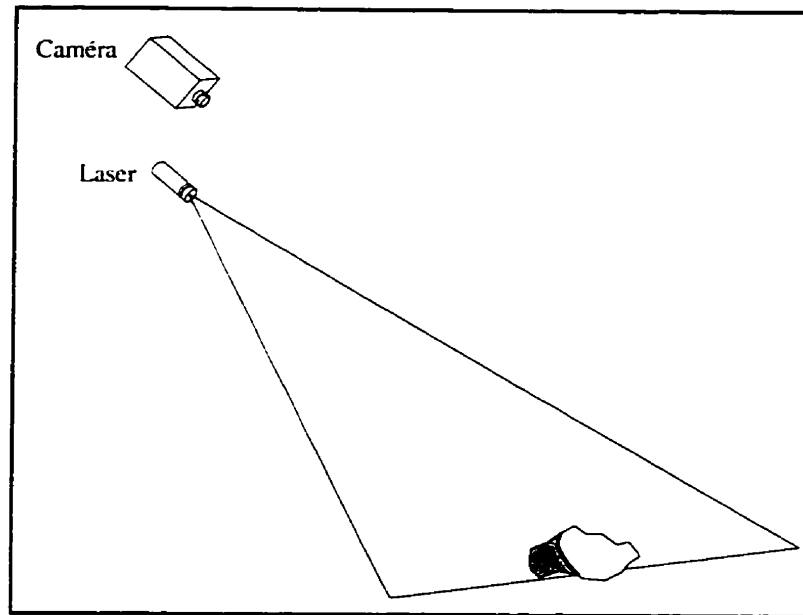
$$D = \frac{df}{P_y D_p} \quad (1.1)$$

où :

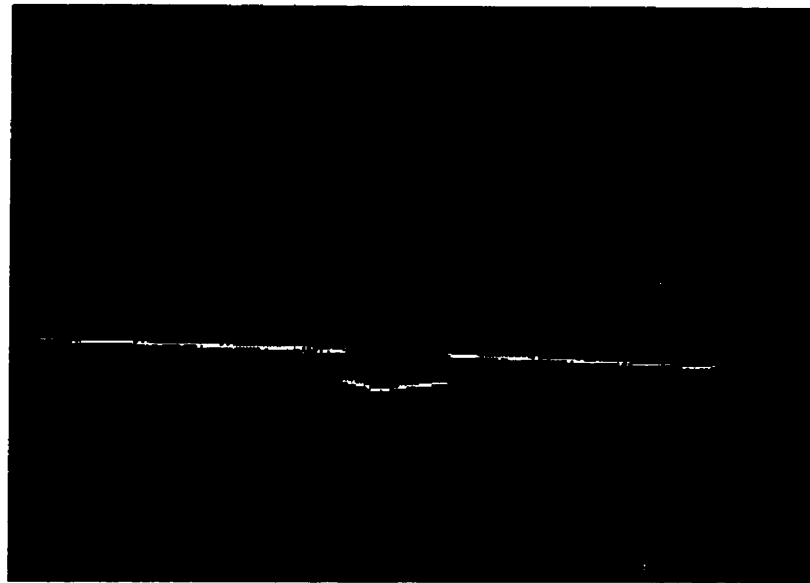
D est la distance entre le laser et l'objet. d est la distance entre le laser et le centre du plan d'image. f est la distance focale de la caméra. D_p est la distance physique entre deux pixels. et P_y est la position en pixels de la projection d'un point de la scène éclairée par le laser dans l'image (par rapport au centre du plan d'image).

L'incertitude sur la distance provoquée par l'incertitude de la position dans l'image ΔP_y est donnée par :

$$\Delta D = \frac{\Delta P_y D_f D^2}{df} = K \frac{D^2}{d} \quad (1.2)$$



(a) Principe d'acquisition d'image.



(b) Image acquise.

Figure 1.1 : Exemple d'image d'une scène éclairée par un plan de lumière laser infrarouge.

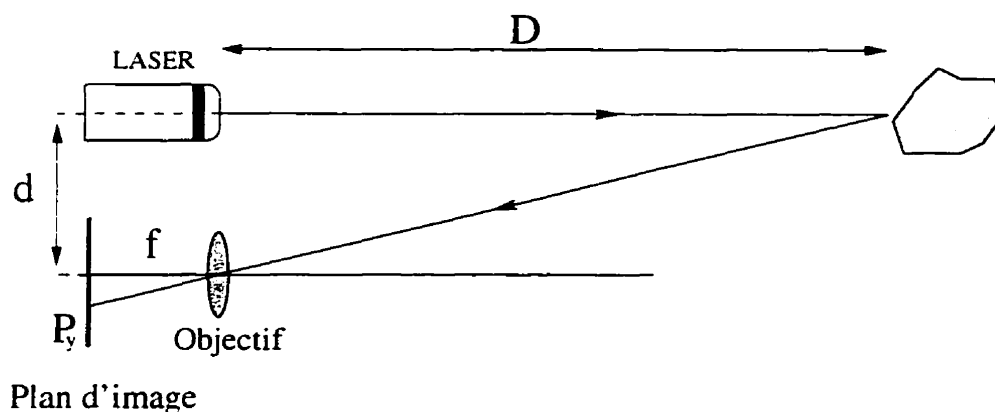


Figure 1.2 : Principe de calcul de la profondeur par un télémètre à lumière structurée.

L'expression 1.2 montre que l'incertitude d'une distance mesurée est une fonction quadratique de la distance entre la source laser et la scène. Par contre, l'incertitude est inversement proportionnelle à la "ligne de base" (distance entre le plan d'image et le laser). Ceci montre que, pour une situation dans laquelle les paramètres de la caméra et la distance D sont fixés, il est préférable d'avoir une grande ligne de base afin de diminuer l'incertitude sur la distance.

Cette méthode nécessite, pour obtenir les coordonnées de chaque point éclairé de la scène, l'utilisation d'une table de références (L.U.T.) obtenue par calibration. Cette approche permet d'obtenir des profils de manière instantanée et donc d'avoir des informations de distance très rapidement avec une résolution angulaire élevée. Un bon aperçu sur les méthodes d'utilisation de ce télémètre est donné dans Evans (1991). Le problème majeur de ce système est l'influence des sources de lumière externes et la réponse optique des objets. En effet, dans un environnement dont les objets sont spéculaires, la lumière réfléchie d'une cible peut ne pas être perçue par

la caméra ou ne pas être uniforme sur tout le profil dans l'image. Dans certains cas, il est possible de corriger ces problèmes soit en augmentant la puissance du laser ou soit en utilisant des formes particulières de sources de lumière par exemple une grille (Moigne et Waxman 1988) ou même une combinaison de ces deux solutions.

1.1.3 Télémètres actifs

Les télémètres actifs sont composés d'un système émetteur et d'un système récepteur. Le système émetteur, comme son nom l'indique, émet de l'énergie vers une cible et l'écho de cette énergie par la cible est analysé par le système récepteur pour déterminer la profondeur. Ce télémètre est basé sur la mesure du temps de vol d'un signal émis par l'émetteur et réfléchi sur le détecteur. Les capteurs ultrasoniques conviennent en général bien à la robotique mobile. Le télémètre à ultrasons émet un faisceau de forme conique vers une cible. Des ondes de retour sont créées par l'impact entre le faisceau et les objets en avant du télémètre. L'amplitude de l'écho est fonction de la position des objets et du pouvoir réflecteur de ces objets. Après une sélection préliminaire des échos en fonction de leur amplitude, la distance entre l'objet le plus proche et le récepteur est calculée en fonction du temps de vol τ (Figure 1.3). La distance entre un objet et le télémètre est donnée par :

$$D = \frac{C\tau}{2} \quad (1.3)$$

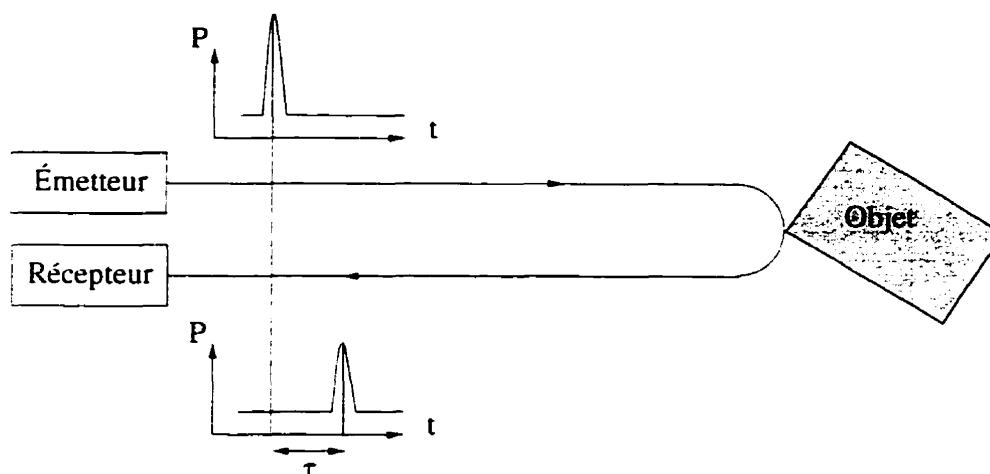


Figure 1.3 : Principe de calcul de la profondeur par un télémètre ultrasons

où C est la vitesse du son dans l'air. En général, une seule mesure n'est pas suffisante ce qui oblige à répéter ce processus plusieurs fois. Les inconvénients de ce système, hormis le temps de processus qui est assez lent, résident dans la résolution angulaire qui est de l'ordre de 15 à 20 degrés (Kuc 1990), ainsi que dans les réflexions multiples et la faible distance d'action (environ 500 cm). Par contre, son indépendance vis-à-vis de l'éclairage le met en valeur pour certaines applications. En ce qui concerne notre application, un télémètre à ultrasons est peu conseillé car, dans les galeries souterraines, les fausses réflexions ou les réflexions multiples sont très fréquentes. Dans la même famille de télémètres, on trouve les télémètres laser à balayage. Ces télémètres utilisent une source laser continue, modulée de façon sinusoïdale. La scène est balayée systématiquement par deux miroirs rotatifs. La distance aux points interceptés est calculée en fonction du décalage de phase entre le signal émis et le signal reçu. Même si c'est un télémètre de haute qualité grâce à sa vitesse de traitement et à sa précision,

il s'avère fragile pour une utilisation dans les environnements miniers.

1.2 Méthodes de détection d'obstacles

On peut repartir les systèmes de détection d'obstacles en deux grandes classes : les systèmes utilisant des caméras passives et les systèmes utilisant des télémètres actifs.

1.2.1 Systèmes utilisant des senseurs passifs

Au début des années 90, plusieurs systèmes ont été proposés utilisant des caméras passives et basés sur une reconstruction de la géométrie 3D de la scène (Davies 1990, Dhond et Aggarwal 1989). D'autres systèmes, au lieu d'essayer de reconstruire la géométrie 3D, ce qui est un processus lent et sensible au bruit, tentaient d'extraire les caractéristiques typiques d'un obstacle. Par exemple, Regensburger et Graefe (1994) cherchent d'abord à détecter les objets qui ressemblent à une automobile, ensuite suivent l'évolution de ces objets dans les images à venir. D'autres, comme Raboisson et Even (1990), segmentent d'abord l'image. Ensuite, les irrégularités des segments de la route sont considérées comme des indices de présence d'obstacles. Dans tous ces cas, les auteurs se basent sur deux faits :

1. l'obstacle se trouve dans un environnement structuré dont la segmentation est aisée.

2. les conditions d'observation (contraste, éclairage) sont favorables.

1.2.2 Systèmes utilisant des senseurs actifs

Le problème central dans les méthodes de détection d'obstacles consiste en la reconstruction de la profondeur de la scène. Étant donné que les systèmes utilisant les caméras passives présentent certaines lacunes pour la construction 3D de la scène, beaucoup de systèmes se sont orientés vers des solutions qui utilisent des télémètres actifs. Dans ce paragraphe, nous allons présenter quelques méthodes basées sur des télémètres actifs pour la construction d'une carte 3D de l'environnement et éventuellement pour la détection d'obstacles.

1.2.2.1 Observation et décision

La détection d'obstacles consiste normalement en deux étapes:

- Observer ¹ l'environnement.
- Analyser si le chemin à suivre est libre.

Ceci suppose que l'on dispose de suffisamment de temps pour analyser les données pertinentes et reprendre l'acquisition et l'analyse s'il y a un doute sur les résultats obtenus. Cette approche pour être efficace exige un temps de calcul suffisant et une puissance de calcul grande.

¹Ce qu'on entend par le mot observer est différent pour chaque senseur et chaque type de représentation de l'environnement.

A titre d'exemple dans (Kuc et Brashan 1989) le robot est doté d'un sonar qui est installé sur une plate-forme possédant un degré de liberté. De cette façon, son environnement peut être balayé avec un angle de -180 à 180 degrés. Pour représenter l'environnement dans lequel le robot se meut, les auteurs utilisent une carte 2D divisée en cases égales ("carte de grilles"). Chaque case de cette carte représente une région de l'environnement réel. Elles sont pleines ou vides selon la présence ou non d'objets dans leurs régions associées. La distance entre deux régions (du monde réel) correspondant au déplacement maximal du robot est de ΔD . Afin de prendre connaissance de son environnement, le robot balaye avec son sonar une zone devant lui de -90 à 90 degrés par intervalles de $\delta\beta$. Il se déplace ensuite d'une case à l'autre (par une translation de ΔD) (voir figure 1.4) si le balayage précédent a permis de confirmer l'inoccupation de cette case. Ce système devient robuste quand $\delta\beta$ et ΔD sont bien choisis. En effet, il est indispensable d'ajuster ces paramètres en fonction du pouvoir réflecteur des objets à détecter (voir section 1.1.3). Malgré les résultats satisfaisants de cette technique, celle-ci est éventuellement trop lente à cause du balayage mécanique. Pour contourner ce problème, une autre solution plus coûteuse est d'utiliser une ceinture de sonars (par exemple (Brooks 1985, Weisbin et al. 1989)). Dans ce cas, le temps qui était consacré au balayage est annulé, mais cependant le problème engendré par les faux échos (un sonar qui reçoit les échos des autres sonars) doit être pris en considération.

Pour optimiser la vitesse du traitement, Borenstein et Koren (1988) proposent une méthode de détection d'obstacles qui se décompose aussi en deux étapes, mais diffère

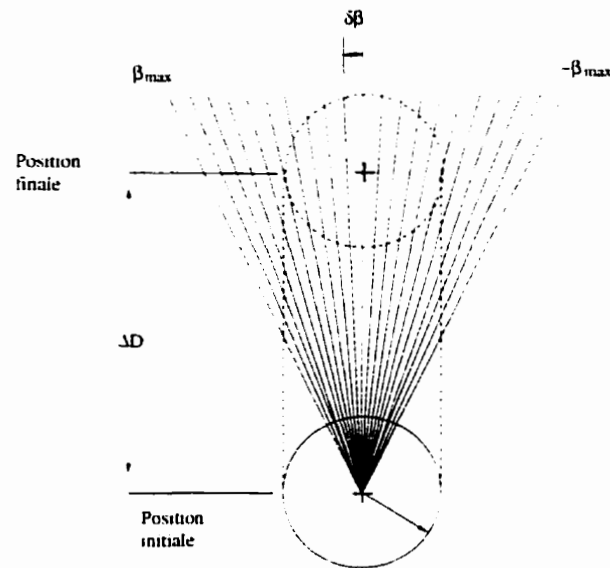


Figure 1.4 : Définition des paramètres de balayage. $\delta\beta$ est la résolution de balayage avec les limites $-\beta_{max}$ à β_{max} et ΔD est le déplacement maximal permis pour une trajectoire sans collision. (Kuc et Brashan 1989)

de celle vue précédemment : dans la première étape qui est appelée *OBSERVATION*, le robot peut se déplacer, et l'avant du robot est alors observé par deux sonars. Le robot s'immobilise et passe à l'étape *MESURE* si un des sonars a déclenché une alarme. L'algorithme pour déclencher l'alarme est :

Si $R_i(j) < TD$ et $R_i(j) \leq R_i(j-1)$ alors ALARME.

où $R_i(j)$ est la mesure prise par le sonar i du temps j et TD est le seuil de mesure (une mesure plus grande que TD est définie comme étant une fausse mesure). Dans l'étape *MESURE*, le robot fait pivoter les sonars, prend des mesures (35 mesures par sonar) et calcule la position exacte de l'obstacle. Il est possible qu'à cause des limitations des sonars, de fausses alarmes soient données ou même que certains obstacles ne soient

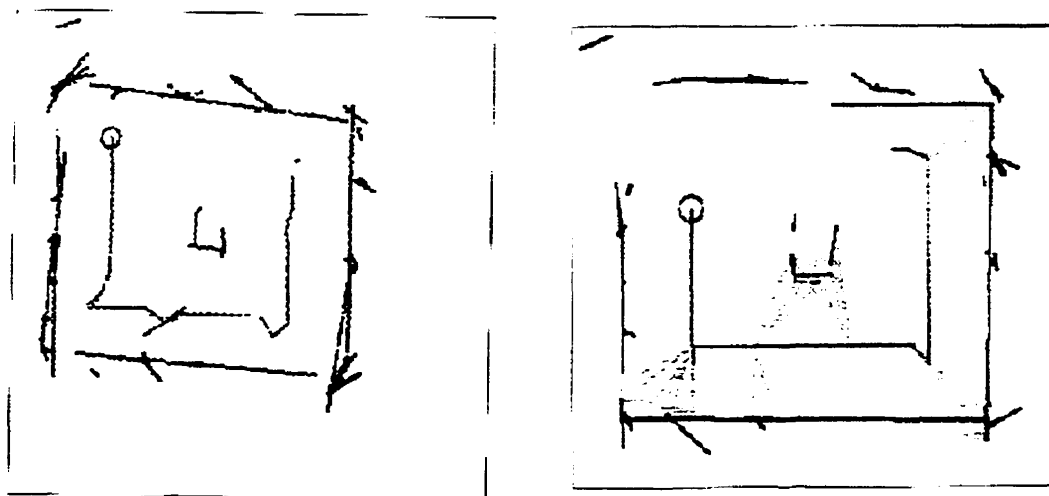
pas détectés. Dès lors, pour assurer la sécurité du robot un pare-chocs de sécurité à détecteur de collisions est placé à l'avant de celui-ci. Il arrêtera le véhicule au contact d'un objet qui n'aura pas été détecté par l'un des deux sonars.

Une autre méthode suggérée par Moigne et Waxman (1988), consiste à construire une carte de niveaux en vue de détecter l'espace libre pour la navigation autonome. Dans cette approche, un télémètre à lumière structurée est utilisé. La forme de la source de lumière projetée est une grille. À chaque itération, les points d'intersection des lignes de profils dans l'image prise par la caméra CCD sont isolés. Ensuite, les coordonnées 3D des points dans la scène correspondant aux points dans l'image sont calculées par une triangulation.

Dans d'autres applications, on munit le robot de plusieurs télémètres afin d'augmenter sa sécurité et d'obtenir une bonne représentation de la scène. Bauzil et al. (1991), par exemple, munissent le robot HILARE II de six télémètres différents pour obtenir une carte de l'environnement de haute précision.

Par contre Dudek et al. (1996) et Rekleitis et al. (1996) proposent d'utiliser chaque senseur dans son temps ("Just in time"). Leur robot est doté seulement de deux sortes de télémètres, d'une ceinture de 12 unités de sonars et d'une caméra BIRIS. L'idée développée est que lorsque le robot se trouve dans un environnement structuré, le télémètre sonar peut très bien détecter les surfaces continues comme les parois, mais ne peut définir avec précision les frontières des objets. Pour éliminer alors les ambiguïtés dans les mesures obtenues par les sonars (par exemple lorsqu'un sonar

détecte un obstacle alors qu'un autre sonar qui est placé à côté ne repère rien) on utilise l'information provenant du télémètre BIRIS. De cette façon, non seulement les mesures prises sont plus précises mais, de plus, le temps de calcul est réduit (voir figure 1.5). En fait, c'est une approche qui ressemble à celle de Borenstein et



(a) Carte d'environnement reconstruite par sonar

(b) Carte d'environnement reconstruite par sonar et BIRIS

Figure 1.5 : Exemple de résultats obtenus pour la reconstruction d'environnement utilisant sonar et caméra BIRIS par l'approche "Just in Time". Dans la figure (b) les traits clairs représentent les mesures prises par la caméra BIRIS. (Rekleitis et al. 1996)

Koren (1988), qui consiste d'abord, à prendre une série de mesures nécessaires pour avoir le minimum d'informations sur l'environnement, et par la suite, dans le cas où certaines ambiguïtés subsistent dans les mesures prises, d'acquérir d'autres mesures pour éliminer ces ambiguïtés.

Dans Veatch et Davis (1990), un obstacle est défini comme *une région, où un véhicule (ou un robot) ne peut pas ou ne doit pas passer* (les cavités comme les objets doivent être évités par exemple). Pour détecter les reliefs et les trous, l'approche développée par ces auteurs est d'isoler les régions où le changement de gradient spatial est significatif. Le télémètre qu'ils emploient est un laser à balayage qui est configuré de façon à être capable de fournir une image de 64×256 points dans un champ $30^\circ \times 80^\circ$ en $0,5$ s avec une résolution de 8 cm. Chaque point dans l'image donne les mesures en coordonnées sphériques (θ, ϕ, ρ) . La géométrie 3D de la scène balayée par le télémètre, en coordonnées cartésiennes peut être exprimée comme suit :

$$\begin{cases} x = \rho \cos(\theta) \\ y = \rho \sin(\theta) \sin(\phi) \\ z = \rho \sin(\theta) \cos(\phi) \end{cases} \quad (1.4)$$

Pour détecter les régions où le changement de gradient spatial est important il suffit de calculer $\partial y / \partial x$ et $\partial y / \partial z$. Comme le passage d'un système de coordonnées à l'autre demande un temps de calcul significatif, Veatch et Davis (1990) démontrent qu'il est possible d'exprimer ces deux éléments en fonction de $(\Delta\theta, \Delta\phi, \rho)$, où $\Delta\theta$ et $\Delta\phi$ sont des pas de discrétisation dans le processus de balayage.

1.2.2.2 Accumulation de données

Certaines approches tentent de construire la carte de l'environnement par accumulation de données de façon à diminuer l'influence du bruit et réduire le temps de traitement.

Les deux méthodes présentées ci-dessous sont basées sur une représentation de l'environnement par une "carte de grilles", dans laquelle à chaque case est associée une étiquette : "Occupée" ou "Libre". Ce qui différencie ces deux méthodes est la manière d'étiqueter les cases de la carte.

Méthode "probabiliste" Cette approche a été élaborée par Moravec et Elfes (1985) et le système a été implanté sur le robot Neptune. Le robot Neptune est muni d'une ceinture de 24 sonars espacés de 15° les uns des autres. L'environnement du robot est balayé systématiquement par ces sonars. Chaque sonar donne une mesure relative par rapport au robot qui confirme si le chemin est libre ou si quelque part devant le robot se trouve un obstacle. Cette information est modélisée par des profils de probabilité qui sont projetés sur la carte 2D. L'algorithme commence par attribuer l'étiquette "Indéterminée" à chaque cellule. A chaque mesure, une cellule reçoit deux mesures de probabilité: $P_E(i, j)$ probabilité que la case (i, j) soit vide et $P_O(i, j)$ probabilité que la case (i, j) soit occupée. Les mesures prises par les sonars et les mesures obtenues par les odomètres sont intégrées dans cette carte. Au fur et à mesure que le robot avance, la valeur des cases se stabilise et l'incertitude ainsi va en décroissant

(Figure 1.6). Elfes (1987) et Borenstein et Koren (1989) utilisent cette approche pour

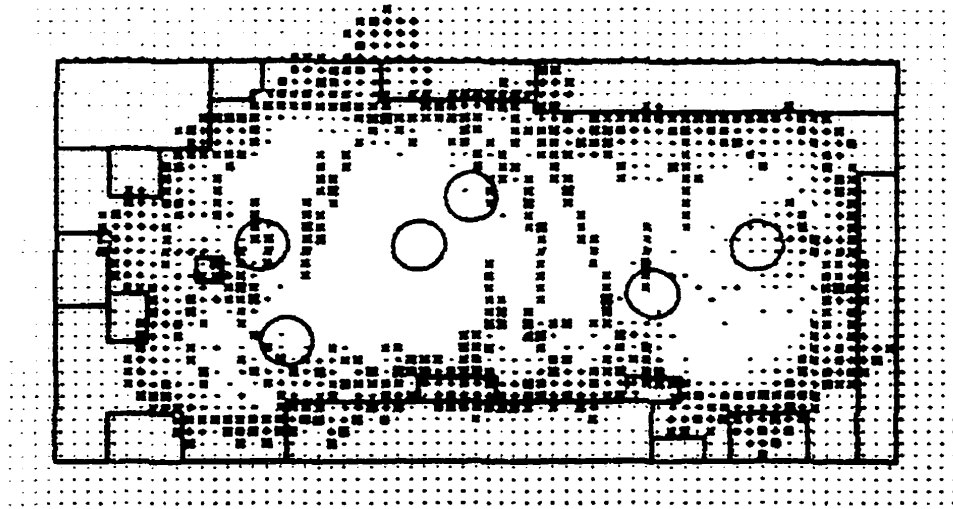


Figure 1.6 : Carte bidimensionnelle représentant les régions d'occupation. Les régions probablement vides sont représentées par des espaces blancs (grande fiabilité) ou par des - (faible fiabilité). Les régions probablement occupées sont représentées par des x. les régions inconnues par des points. Les cercles montrent les positions du robot d'où les mesures ont été prises. Les traits pleins représentent l'environnement (Moravec et Elfes 1985).

la création de la carte d'environnement et pour la planification de chemin dans cet environnement.

Afin d'optimiser la fiabilité de ce système, ce modèle est utilisé dans Matthies et Elfes (1988). pour intégrer des données provenant de sonars et d'un système de vision stéréoscopique. Leur méthode commence par interpréter les mesures obtenues par ces deux senseurs. Puis, ces mesures sont intégrées dans deux cartes 2D différentes utilisant une stratégie bayésienne. Enfin, les deux cartes sont fusionnées en une carte unique par un mécanisme de Bayes. La carte obtenue par cette méthode est plus

raffinée au niveau des contours des obstacles. Ceci est dû au fait que les informations fournies par les deux systèmes se complètent. Une extension de ce travail, par Rencken (1994), estime les erreurs introduites dans la construction de la carte et dans la localisation du robot. Une méthode heuristique par hypothèses multiples est proposée pour décider de quelle mesure provient chaque caractéristique détectée.

Méthode “par histogramme” Cette méthode a été implantée par Borenstein et Koren (1991a) sur le robot CARMEL. Le système de télémètre utilisé est une ceinture de 24 sonars. À l’opposé de la méthode présentée auparavant, l’algorithme commence par attribuer l’étiquette “vide” à toutes les cases de la carte. Ensuite, à chaque série de mesures prises par les sonars, seulement les cases qui se situent sur l’axe acoustique du sonar reçoivent un *vote* (négatif ou positif) et ceci dans le cas où le sonar a détecté un objet. Le vote négatif enlève la valeur I^- de la case et le vote positif change la valeur d’une case de la manière suivante (Figure 1.7) :

$$CV_{i,j} = \max \left(CV_{i,j} + I^+ + \sum_{p,q=-1}^{p,q=1} (W_{p,q} CV_{i+p,j+q}) . CV_{max} \right)$$

où :

$CV_{i,j}$ est la valeur de la case i, j .

$W_{p,q}$ est le poids associé à une case.

CV_{max} est la valeur maximale qu’une case peut recevoir.

$W_{p,q}$ et CV_{max} sont choisis en fonction de la vitesse du robot. Enfin, les cases sont étiquetées par un seuillage.

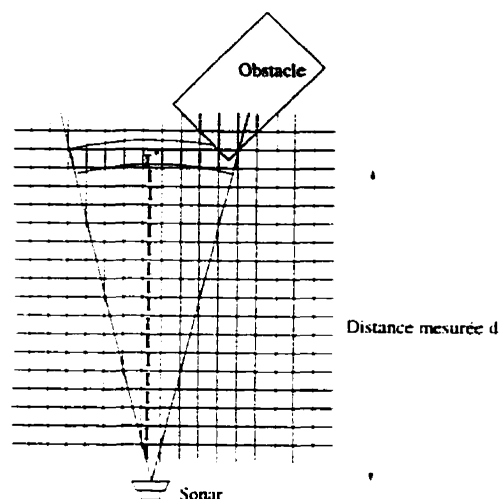
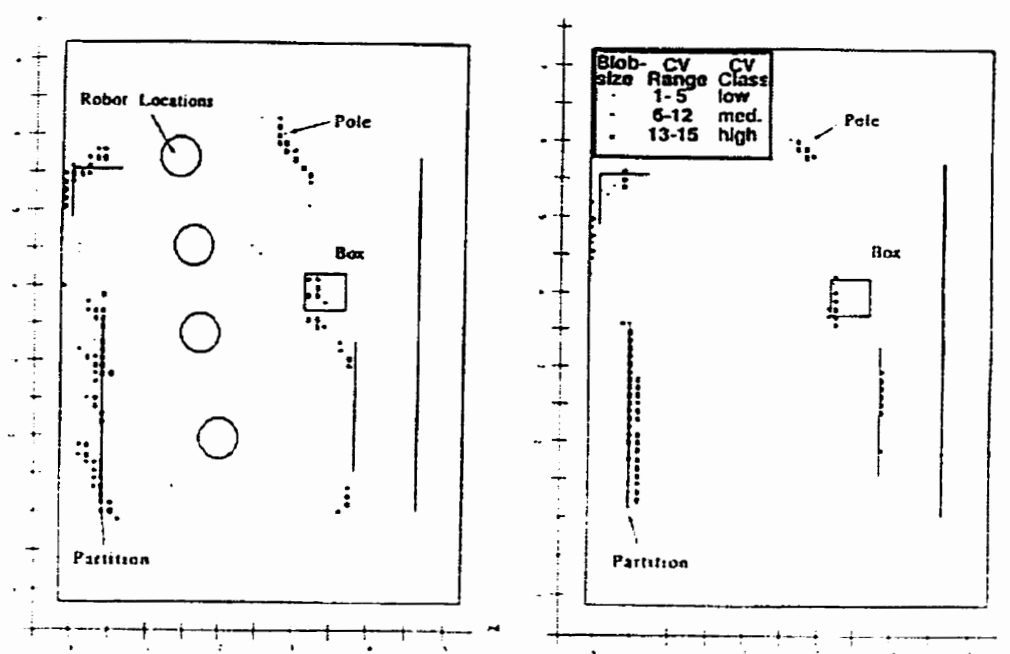


Figure 1.7 : Méthode de correction des cases dans l'approche "par histogramme" (Borenstein et Koren 1991a).

Stuck et al. (1994) utilisent cette méthode pour la reconstruction de l'environnement et la planification de chemin. Les télémètres utilisés sont une ceinture de sonars et un télémètre BIRIS.

Dans Raschke et Borenstein (1990), une comparaison a été établie entre la méthode "Probabiliste" et la méthode "par histogramme". L'article démontre que la méthode "par histogramme" est plus rapide que la méthode "Probabiliste" et ceci tout en étant aussi robuste. De plus, les résultats prouvent que la méthode "par histogramme" définit mieux les frontières des objets (Figure 1.8).



(a) Carte d'environnement reconstruit par l'approche "Probabiliste".

(b) Carte d'environnement reconstruit par l'approche "par histogramme".

Figure 1.8 : Résultats de reconstruction de la carte obtenus par les approches "Probabiliste" et l'approche "par histogramme" (Raschke et Borenstein 1990).

1.3 Conclusion

Nous présentons tout d'abord une comparaison des méthodes de détection d'obstacles présentées ci-dessus, suivie d'une justification du choix du télémètre choisi pour notre système de détection d'obstacles.

Comparaison des systèmes de détection d'obstacles Dans la section 1.2 nous avons présenté plusieurs systèmes pour la détection d'obstacles. Ces systèmes ont été divisés en deux groupes, les systèmes qui utilisent les caméras CCD, et les systèmes

qui utilisent les télémètres actifs.

La lacune principale des systèmes qui utilisent les caméras passives pour la détection d'obstacles ou pour la reconstruction de la géométrie 3D d'une scène est la complexité de traitement des images acquises. En général, ces systèmes exigent une architecture complexe et coûteuse. De plus, ces méthodes sont fiables seulement dans des conditions bien particulières telles qu'un environnement structuré.

Les systèmes utilisant les télémètres actifs ont été divisés en trois groupes : (1) Les systèmes utilisant un ou plusieurs télémètres pour la reconstruction de la carte de l'environnement. Ces systèmes exploitent d'habitude des algorithmes simples, utilisent un ou plusieurs télémètres actifs pour décrire l'environnement. Ils sont lents à cause du temps consacré à l'analyse des données, et leur fiabilité dépend du temps dédié à l'analyse des mesures. (2) Les systèmes qui définissent d'abord les caractéristiques des obstacles pour ensuite les détecter. Plutôt qu'une représentation de la géométrie 3D de la scène ces systèmes définissent d'abord les caractéristiques d'un obstacle. Ces caractéristiques sont ensuite cherchées dans la scène pour isoler les régions occupées par les obstacles. (3) Les systèmes qui construisent une carte de grilles d'occupation en accumulant des données. L'avantage principal de ces méthodes par rapport aux autres est dans le fait que l'information sur la géométrie de la scène est obtenue plus rapidement et que la susceptibilité au bruit est diminuée

Choix du télémètre Les critères d'évaluation des capteurs pour un système de détection d'obstacles, dans un environnement minier sont : la résolution, la précision,

le temps d'acquisition des mesures, la portée maximale et l'indépendance par rapport à l'éclairage. Le tableau 1.1 donne un résumé de la section 1.1. Une analyse des

Tableau 1.1 : Capteurs pour détection d'obstacles

	Vision passive (1 ou plusieurs CCD)	Lumière structurée	Sonar	Laser à balayage
Résolution	Très élevée	Très élevée	Très faible	Très élevée
Précision	Bonne	Élevée	Faible	Très élevée
Fréquence d'acquisition	Élevée	Élevée	Bonne	Très élevée
Portée maximale	Très élevée	Élevée	Faible	Très élevée
Résistance mécanique	Très élevée	Très élevée	Très élevée	Faible
Indépendance de l'éclairage	Très faible	Bonne à élevée	Très élevée	Très élevée
Coût	Faible	Moyen	Faible	Élevé

éléments apportés dans ce tableau, montre que le télémètre à lumière structurée répond le mieux à notre application. Tout d'abord, sa résistance aux vibrations mécaniques le favorise par rapport au télémètre laser à balayage. Ensuite, le fait que l'utilisation d'un télémètre à lumière structurée ne nécessite pas des conditions d'observation particulières, le met en valeur par rapport aux caméras passives. Enfin, sa résolution, sa précision de mesure, sa portée maximale et, surtout, sa fréquence d'acquisition des mesures justifient son choix par rapport au sonar.

Un critère additionnel qui doit être pris en considération est le temps exigé pour le traitement des "données" acquises par le télémètre. Les images fournies par le télémètre à lumière structurée sont simples à traiter, ceci dans le cas où la forme lu-

mineuse projetée est simple (ex. plan). Par contre, lorsque la forme lumineuse choisie est plus compliquée (matrice de points, grille), le traitement des images acquises devient alors plus complexe. Il est important de noter que la complexité des patrons augmente l'information sur la profondeur de la scène. Dès lors, le choix de cette forme doit être fait d'une part, de manière à nous donner suffisamment d'information sur la scène et d'autre part de manière à engendrer un traitement des images qui sera simple et rapide.

Dans notre application, le patron de lumière structurée choisi est une nappe lumineuse plane. L'intersection de ce plan avec la scène projette un profil lumineux dans l'image. Pour détecter les obstacles, nous cherchons à détecter des irrégularités (des détachements) dans ce profil.

En conclusion, en tenant compte des avantages et des désavantages de chacun des senseurs présentés et en examinant les conditions dans lesquelles le senseur choisi doit fonctionner, nous constatons que le télémètre à lumière structurée avec un plan laser est celui qui se prête le mieux à notre application. Par contre, sa susceptibilité aux conditions de l'environnement (résolution, réponse optique des objets, interférence optique, etc.), exigera un certain pré-traitement des images prises pour obtenir des résultats fiables.

Nous décrivons dans le chapitre suivant la structure générale du système de détection développé dans ce travail.

Chapitre 2

Description du système proposé

Après avoir expliqué notre choix du télémètre, nous allons aborder dans ce chapitre la géométrie du système et son aspect général. Le choix des paramètres et l'idée générale de l'algorithme seront aussi discutés.

Considération générale Dans le contexte de détection d'obstacles, nous nous sommes basés sur l'idée de Veatch et Davis (1990) qui proposent l'approche suivante : *pour détecter les obstacles, la géométrie 3D de la scène ne doit pas être décrite à 100%.*

Le système proposé emploie des télémètres à lumière cohérente dont chacun est composé d'une caméra CCD et d'une diode laser. L'idée générale est de développer un système qui exploite directement le contenu des images prises par ces caméras et, en particulier, l'évolution temporelle des événements dans ces images pour détecter la présence d'obstacles. De cette manière, la reconstruction de la géométrie 3D qui

est un processus lent et sensible au bruit, est évitée.

Architecture Le système se compose de trois télémètres à lumière structurée, disposés conformément à la figure 2.1. Les trois modules sont placés de façon à pou-

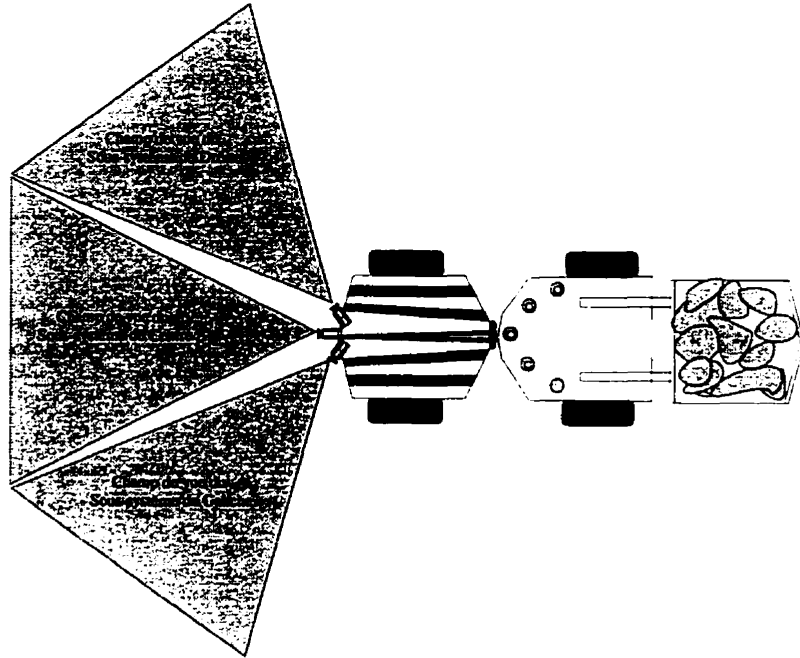


Figure 2.1 : Disposition du système proposé.

voir couvrir tout l'espace devant le véhicule de manière complémentaire. Chacun des lasers est muni d'un objectif cylindrique et configuré de manière à projeter trois plans lumineux conformément à la figure 2.2. Chaque diode laser émet à une fréquence lumineuse particulière et chacune des caméras est munie d'un filtre passe-bande approprié, correspondant à la fréquence de la diode laser de son module. De cette manière, l'image acquise par la caméra d'un module contient seulement les trois profils du laser associé.



Figure 2.2 : Disposition de senseur sur le véhicule (sous-système de centre).

Comme illustré à la figure 2.3, chaque module possède aussi une unité de cal-

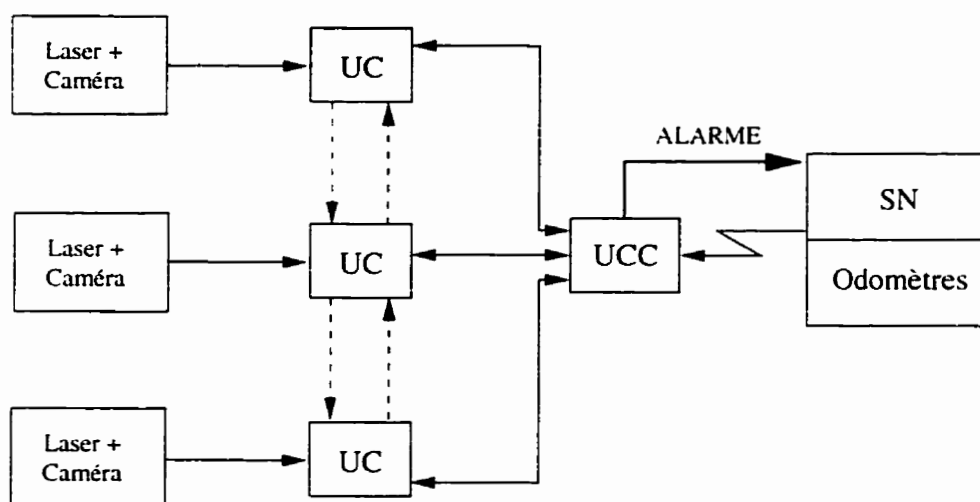


Figure 2.3 : Diagramme structurel du système de détection d'obstacles.

cul ("UC") pour le traitement des images acquises. Les trois "UC" communiquent entre elles au besoin pour un échange d'informations. Les résultats des analyses des trois "UC" ainsi que les données des odomètres et d'autres informations provenant du système de navigation ("SN") sont communiqués à une unité de calcul centrale ("UCC"). Celle-ci rassemble toutes les données mentionnées et ordonne à son tour (dans

certains cas) des échanges d'informations entre les "UC" ou déclenche une alarme avertissant le "SN" de la présence d'un obstacle. Si le véhicule peut circuler dans les deux directions (avant et arrière), on doit installer deux de ces systèmes (un à l'avant et un à l'arrière du véhicule).

Principe de base La figure 2.4 illustre le schéma-bloc général du système proposé. Les diodes laser dans le système de lumière structurée (bloc 1) projettent chacune trois plans de lumière cohérente dans la scène. L'intersection de ces plans avec les objets et éventuellement avec les obstacles apparaît comme des profils lumineux dans les images prises par les caméras CCD (bloc 2). Après un traitement de ces images, nous cherchons à détecter les profils ou sections de profils qui paraissent incompatibles avec l'hypothèse d'un chemin navigable (bloc 3). Il s'agit, à ce stade, de détecter dans l'image de l'intersection entre la scène et chaque plan laser, la présence d'un segment de profil dont la nature (longueur, orientation, détachement du reste du profil) et la position soient symptomatiques d'un événement de terrain tel qu'un obstacle. Par la suite, l'évolution d'un tel événement est suivie temporellement (d'une image à l'autre) jusqu'à atteindre un point critique (bloc 4), pour déclencher alors une alarme.

2.1 Structure générale

Cette section donne une description détaillée de l'un des trois senseurs. Les deux autres ont une structure identique.

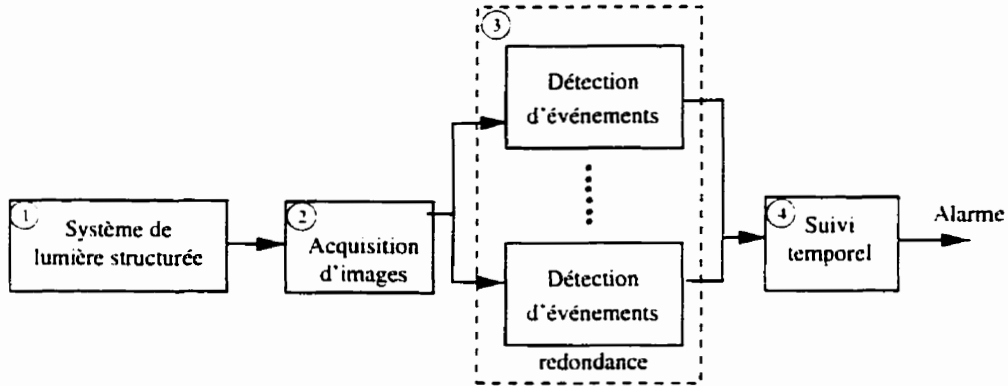


Figure 2.4 : Schéma-bloc général du système proposé.

2.1.1 Repères

La figure 2.5 montre les différents repères utilisés pour l'analyse du système. On y trouve les repères suivants :

- repère global $R_r = (\vec{R}_x, \vec{R}_y, \vec{R}_z)$ lié à la route.
- repère véhicule $R_v = (\vec{V}_x, \vec{V}_y, \vec{V}_z)$ lié à un point de référence en avant du véhicule.
- repère $R_l = (\vec{L}_x, \vec{L}_y, \vec{L}_z)$ lié au plan laser.
- repère $R_c = (\vec{C}_x, \vec{C}_y, \vec{C}_z)$ lié au centre optique de la caméra.
- repère $R_i = (\vec{I}_x, \vec{I}_y)$ lié au centre du plan d'image.
- repère $R_p = (\vec{P}_x, \vec{P}_y)$ correspond au plan d'image discrétisé.

Les repères R_r et R_v sont utilisés pour simuler le mouvement du véhicule dans les galeries virtuelles, R_l , R_c et R_i sont utilisés pour la création des images et enfin R_p est utilisé pour l'analyse des images simulées.

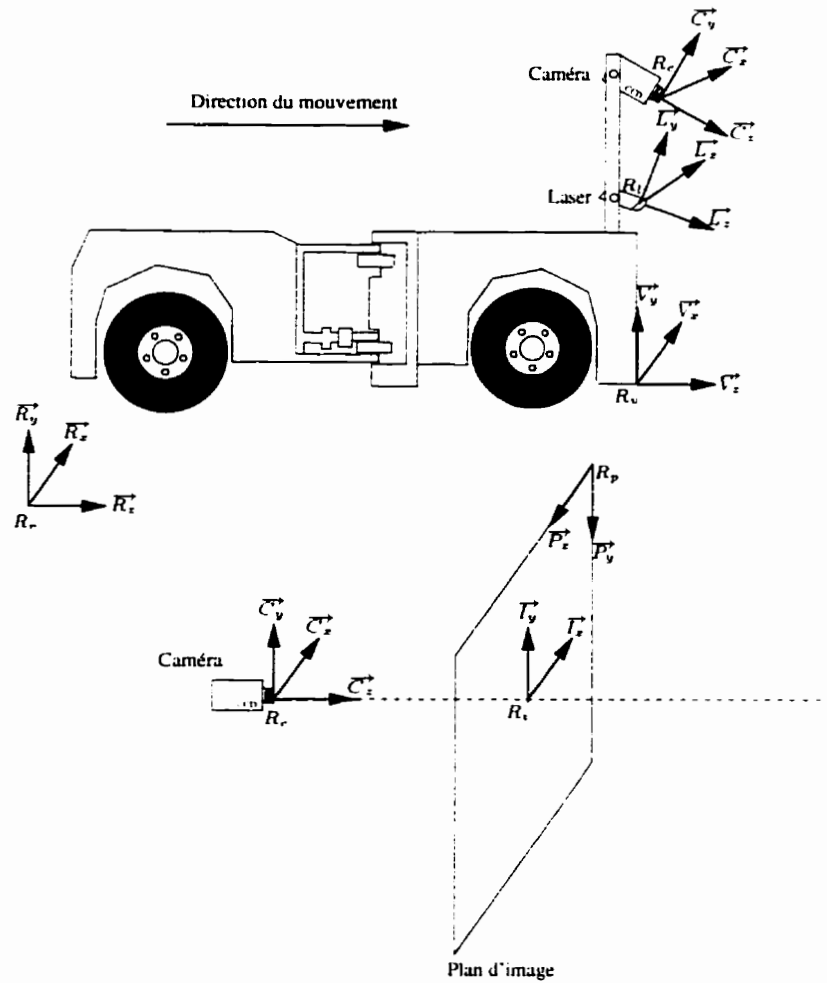


Figure 2.5 : Repères utilisés pour l'analyse du système.

Les transformations qui permettent le passage entre les différents repères sont les suivantes :

T_{rv} est la transformation homogène qui lie R_r à R_v . Celle-ci définit la position de R_v dans R_r à chaque instant donné. La transformation T_{vl} qui lie le repère véhicule aux repères des lasers est composée d'une translation et d'une rotation angulaire. Il en va de même pour la transformation T_{lc} qui lie les repères lasers au repère caméra.

L'avant-dernière transformation T_{ci} définie est la mise à l'échelle du repère caméra R_c par rapport au repère image R_i . Finalement, la discrétisation du plan d'image est la transformation T_{ip} qui permet le passage du repère image R_i au repère pixels R_p .

2.1.2 Modèle de la caméra

Pour modéliser la caméra, nous utilisons le modèle du trou d'épingle (Duda et Hart 1973). Chaque point M de l'espace visible, de coordonnées $(X, Y, Z)^t$ dans le repère caméra R_c , est projeté en un point $m = (x, y)^t$ dans le plan image. Les nouvelles coordonnées sont liées aux anciennes par les équations de la transformation T_{ci} (Figure 2.6) :

$$\begin{cases} x = -\frac{X}{Z}f_x \\ y = -\frac{Y}{Z}f_y \end{cases} \quad (2.1)$$

où f_x et f_y sont les distances focales de la caméra dans les directions horizontale et verticale respectivement.

Le point m est projeté dans le repère R_p en $p = (p_x, p_y)^t$ par la transformation T_{ip} :

$$\begin{cases} p_x = \frac{N_x}{2} - \left\lfloor \frac{x}{D_p} \right\rfloor \\ p_y = \frac{N_y}{2} - \left\lfloor \frac{y}{D_p} \right\rfloor \end{cases} \quad (2.2)$$

L'image est une matrice de $N_x \times N_y$ pixels et D_p est la distance entre deux pixels dans le plan d'image.

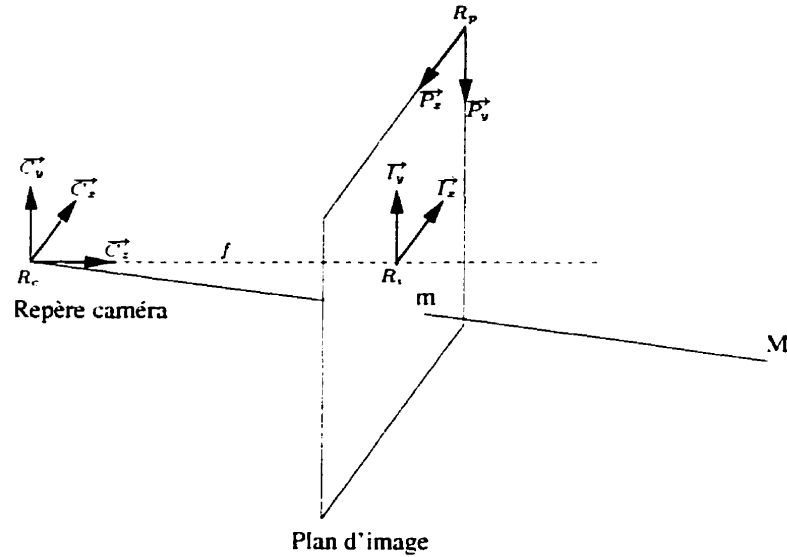


Figure 2.6 : Modèle de la caméra.

2.1.3 Modèle de la source de lumière laser

La diode laser projette un plan de lumière assimilable à une série de rayons coplanaires à intervalles angulaires réguliers $\delta\alpha$ (Figure 2.7). La direction de chaque rayon dans l'espace est obtenue par la rotation du vecteur principal \vec{L}_z dans le plan (x, z) dans le repère R_l . Le vecteur \vec{L}_y est utilisé pour donner l'orientation de ce plan dans le repère véhicule R_v . Le nombre de rayons projetés et l'écartement angulaire α_{ouv} sont des paramètres variables du système.

2.2 Conception préliminaire du système

Une fois les deux valeurs h (la hauteur de l'obstacle) et L (la distance à laquelle l'obstacle doit être détecté) sont spécifiées, il existe une relation liant les deux valeurs

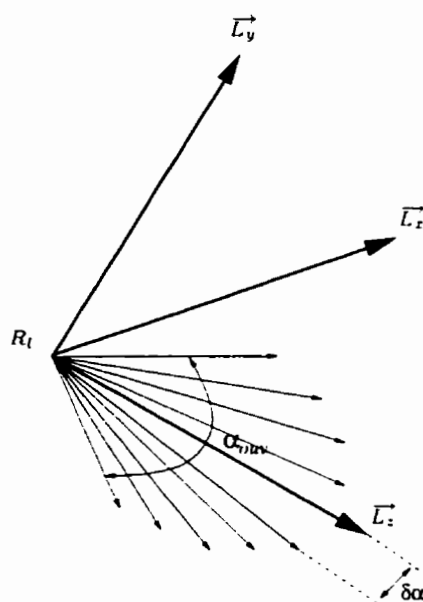


Figure 2.7 : Modèle de la source de lumière laser.

H_l (la hauteur à laquelle le laser est placé) et α_l (l'angle d'inclinaison¹ du plan laser rapport à la verticale) (Figure 2.8). Cette relation a pour expression :

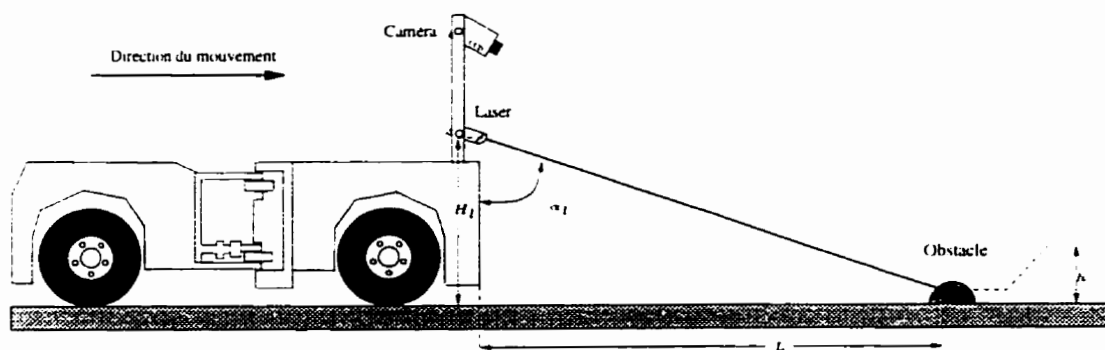


Figure 2.8 : Position de la diode laser sur le véhicule.

¹ Pour simplifier les notations, dans les sections à venir, on nomme α_l l'angle d'inclinaison du laser au lieu de l'angle d'inclinaison du plan laser

$$L = \tan(\alpha_l) \times (H_l - h). \quad (2.3)$$

Le choix des valeurs appropriées pour H_l et α_l sera discuté dans la section 2.4.1.

Il est également nécessaire de définir la position du laser par rapport à la caméra. La caméra doit être placée de manière à voir tout point éclairé par le laser. Fixer la caméra au-dessus du laser semble alors être la seule possibilité. En effet, si la source de lumière laser était placée au-dessus de la caméra il pourrait alors advenir dans certaines conditions que la lumière réfléchie du laser soit occultée par une roche comme l'illustre la figure 2.9. Nous ne pouvons pas dans notre application ignorer ce fait ou le contourner.

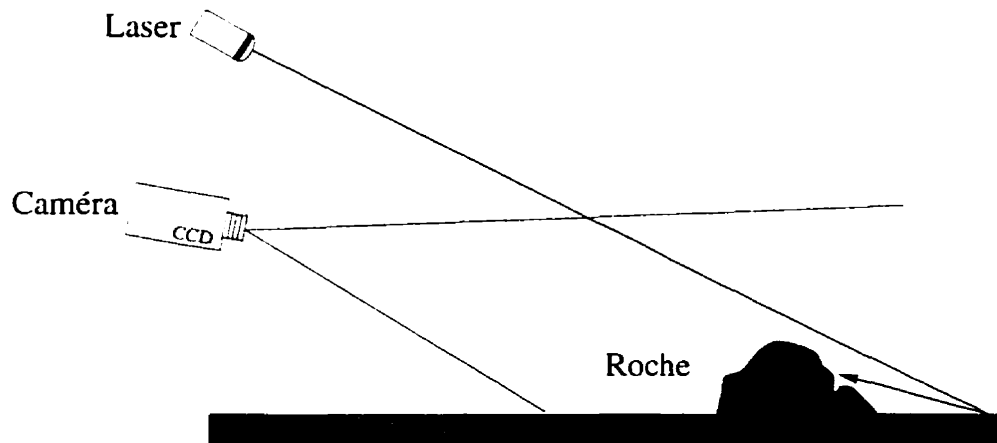


Figure 2.9 : Cas d'occultation lorsque la diode laser est située au-dessus de la caméra.

2.3 Détection d'obstacles

2.3.1 Considérations géométriques

Une fois la scène éclairée par le plan laser, l'intersection de ce plan de lumière avec le sol et les obstacles éventuels se traduit par un profil dans le plan d'image. L'analyse de ce profil permet d'obtenir à chaque instant l'information de relief de l'intersection de ce plan avec la scène. Lorsque le véhicule se déplace, le plan laser balaye la scène longitudinalement et une série de profils est donc accumulée. En rassemblant les résultats provenant de l'interprétation de ces profils et les données odométriques, il est possible de déduire la largeur², la hauteur et la position (distance et azimuth) de tous les objets (parois, sol et obstacles) éclairés. La précision des résultats dépend de la vitesse d'interprétation des profils et de l'exactitude des données des odomètres (vitesse du véhicule).

Dans un cas idéal, on peut supposer qu'on est situé dans une galerie minière dont le sol est uniformément plat. L'image de celui-ci³ éclairé par un plan laser peut être approché par une droite, d'équation $y = ax + b$ dans le repère pixels R_p . De plus, par un ajustement des paramètres (α_l l'angle d'inclinaison du laser et α_c l'angle d'inclinaison de la caméra), le profil du sol sera une droite horizontale dans l'image. Cette droite peut être décrite par une équation de forme $y = b$. Un exemple d'image

²Notons que la largeur de l'obstacle dans notre application n'est guère significative car une fois l'obstacle détecté, celui-ci ne peut pas être contourné tout simplement à cause du manque d'espace.

³Nous supposons que les sols des galeries sont plats, dans le cas où ceci s'avère incorrect, les équations linéaires que nous allons mentionner peuvent être remplacées par des équations d'ordre deux.

réelle du sol uniformément plat (plancher de laboratoire) est présenté dans la figure 2.10. Dans des conditions semblables, la présence d'un obstacle devant le véhicule

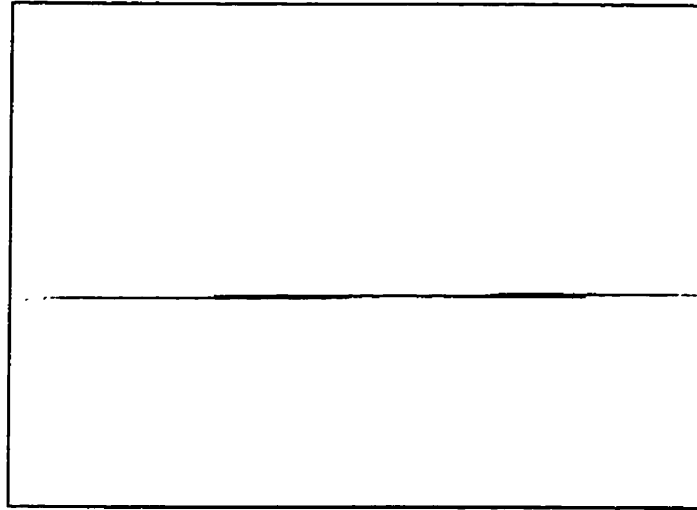


Figure 2.10 : Image réelle d'un sol uniformément plat éclairé par un plan laser.

se traduit par un détachement de ligne du profil du sol dans l'image (Figure 2.11). Une fois ce détachement détecté, nous pouvons trouver les deux valeurs qui nous intéressent, soit h la hauteur à laquelle le laser touche l'obstacle, et L la distance entre le véhicule et l'obstacle. De plus, l'équation 2.3 montre qu'une fois les paramètres de conception H_l et α_l choisis, il suffit de calculer la hauteur h pour obtenir la distance L . En incorporant les deux équations 1.1 et 2.3, nous obtenons les valeurs h et L en fonction de la position verticale du profil laser dans l'image p_y de la manière suivante :

$$\begin{cases} h(p_y) = \frac{H_c \tan(\alpha_c - \alpha) - H_l \tan(\alpha_l)}{\tan(\alpha_c - \alpha) - \tan(\alpha_l)} \\ \alpha = \arctan\left(\frac{2 \times p_y - N_y}{2f_y} \times D_p\right) \end{cases} \quad (2.4)$$

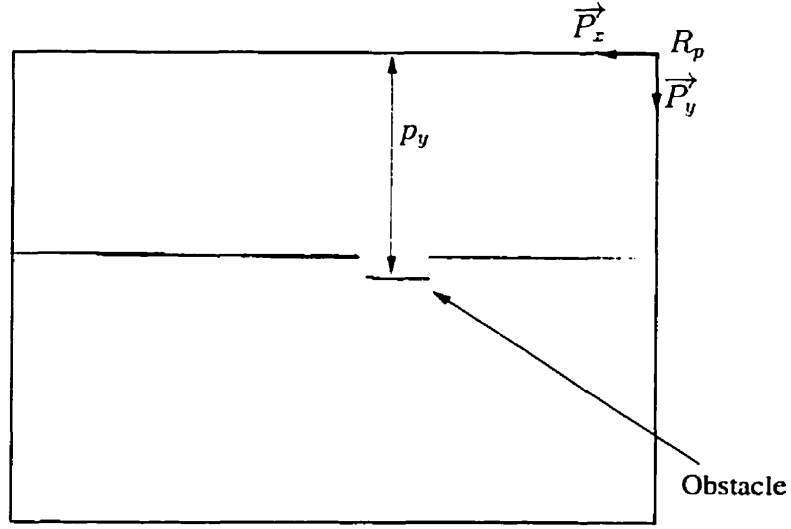


Figure 2.11 : Image réelle d'un sol uniformément plat et d'un obstacle éclairé par un plan laser.

$$L(p_y) = \tan(\alpha_l)(H_l - h) \quad (2.5)$$

où (Figure 2.12) H_c est la hauteur à laquelle est placée la caméra. H_l est la hauteur à laquelle est placé le laser. α_c est l'angle d'inclinaison de la caméra par rapport à la verticale. α_l est l'angle d'inclinaison du laser par rapport à la verticale, et l'image est une matrice de $N_x \times N_y$ pixels. En inversant l'équation 2.4, on peut obtenir la position du profil laser (en pixels) dans le plan d'image en fonction de la hauteur d'un objet localisé par le système, comme suit :

$$p_y(h) = \frac{N_y}{2} + \left\lceil \tan\left(\alpha_c - \arctan\left(\frac{(H_l - h) \tan(\alpha_l)}{H_c - h}\right)\right) \frac{f_y}{D_p} \right\rceil \quad (2.6)$$

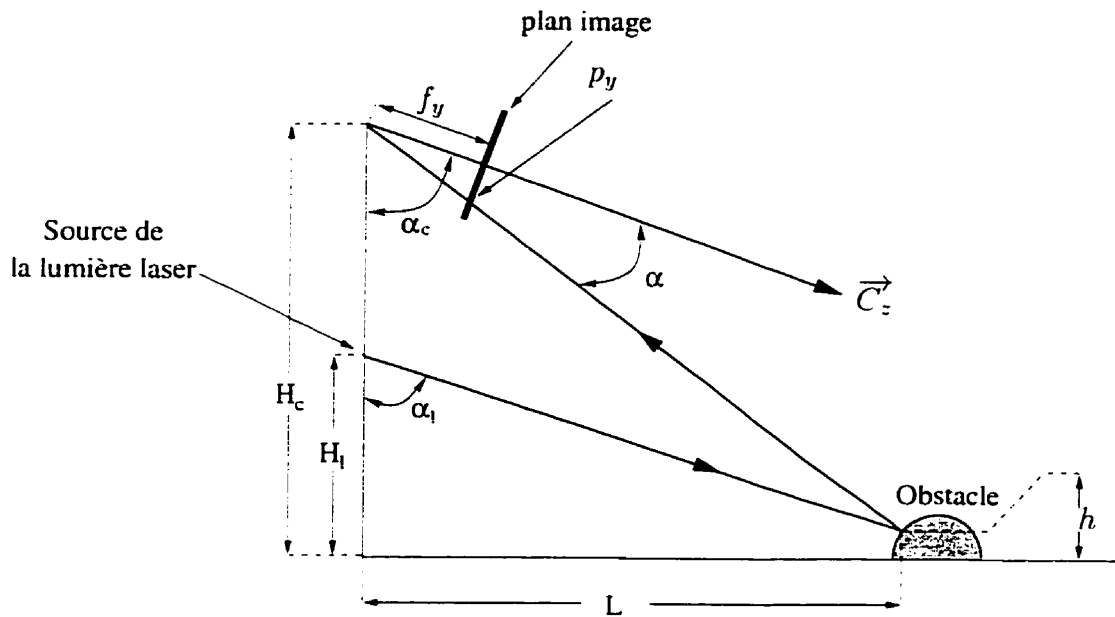


Figure 2.12 : Calcul de h et L .

2.3.2 Détection dans le plan image

2.3.2.1 Principe de base

En analysant les équations 2.4 et 2.6 nous pouvons déduire, que pour détecter un obstacle, la reconstruction de la géométrie 3D n'est pas nécessaire puisque dans un cas où le sol est uniformément plat et dans l'image les bruits sont absents, une discontinuité de la ligne du profil du sol dans l'image ne peut provenir que de la présence d'un obstacle devant le véhicule. La position de cette discontinuité dans l'image correspond à une certaine hauteur de l'obstacle dans la scène, qui une fois calculée permettra d'effectuer la détection d'obstacles. De plus, afin de ne pas être obligé d'effectuer la recherche dans toute l'image pour détecter les discontinuités, on

peut définir un seuil de danger dans l'image. Ce seuil est obtenu en incorporant h_{min} dans l'équation 2.6. Une Zone de Danger (ZD) pourra être définie à partir de ce seuil (Figure 2.13). Si une portion de la ligne laser apparaît dans cette zone, on conclura

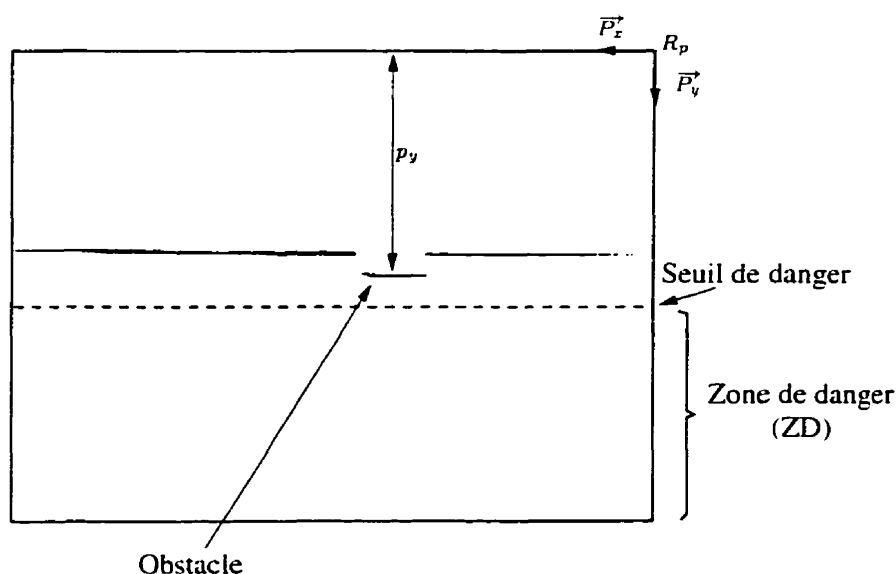


Figure 2.13 : Définition d'une zone de danger (ZD) dans l'image (image réelle)

alors qu'un obstacle se situant devant le véhicule encombre le passage.

Le principe présenté auparavant, aussi simpliste et rapide qu'il puisse paraître, n'est pas pour autant sans difficultés et ne nous satisfait pas entièrement. En effet, les images acquises par une caméra CCD sont sensibles au bruit (dans notre cas, ce bruit peut être occasionné par l'éclairage externe ou par une mauvaise réflexion du laser). De plus, il est très rare d'être dans le cas idéal d'un sol uniformément plat dans une galerie minière. Dans ces conditions, l'image obtenue est bruitée et le profil du sol est ondulé comme illustré à la figure 2.14. Il sera donc possible d'apercevoir des pixels allumés dans la zone ZD alors qu'ils ne devraient pas s'y trouver, ce phénomène étant

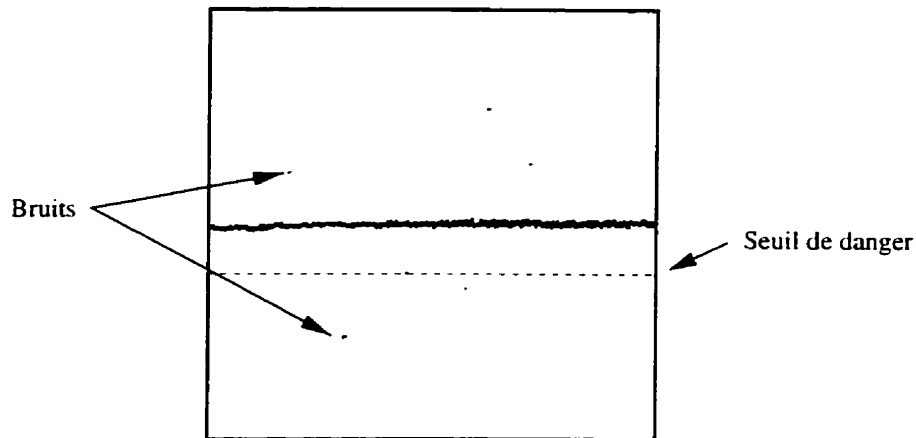


Figure 2.14 : Image simulée d'un sol irrégulier.

dû au bruit et non à la présence d'un obstacle. De plus, dans certaines conditions spécifiques, comme par exemple lorsque le véhicule bascule en raison de son passage sur la dénivellation du sol, on constate qu'une partie de la ligne du laser est présente dans la zone de danger (Figure 2.15). Pour répondre à ce problème, le mieux sera de définir une distance minimale (DM) et non une zone. Cela implique que pour déclencher l'alarme, il faut que la distance entre le segment détaché et le profil du sol soit plus grande que DM. De plus, pour une détection robuste et intervenant à temps, il est nécessaire de suivre l'évolution de l'obstacle dans l'image afin de s'assurer que ce ne sont pas les bruits ou les vibrations du véhicule qui amènent à croire à la présence d'un obstacle mais plutôt l'évolution systématique du segment détaché jusqu'à atteindre la distance minimale "DM". Ce suivi s'effectue de la manière indiquée dans la figure 2.16. Il doit consister en :

1. l'extraction du profil du sol.

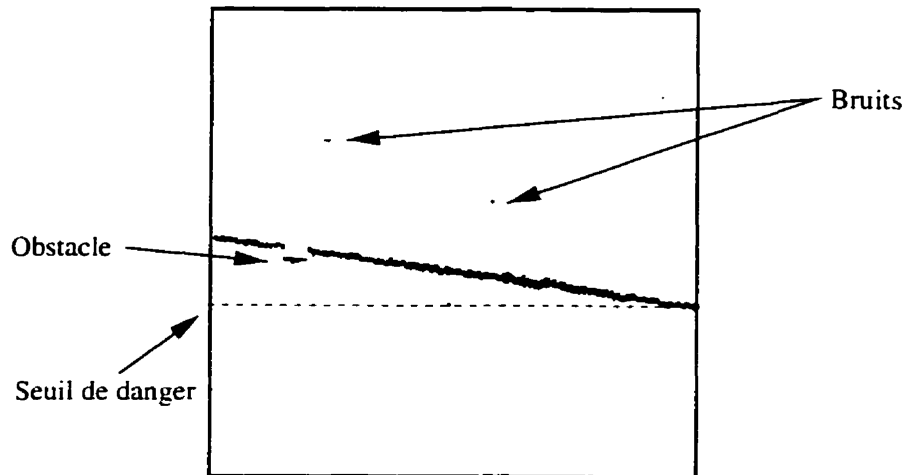


Figure 2.15 : Image simulée d'un sol irrégulier et d'un obstacle dans le cas d'un basculement du véhicule dû à une roche (on remarque que le profil du sol a dépassé le seuil de danger).

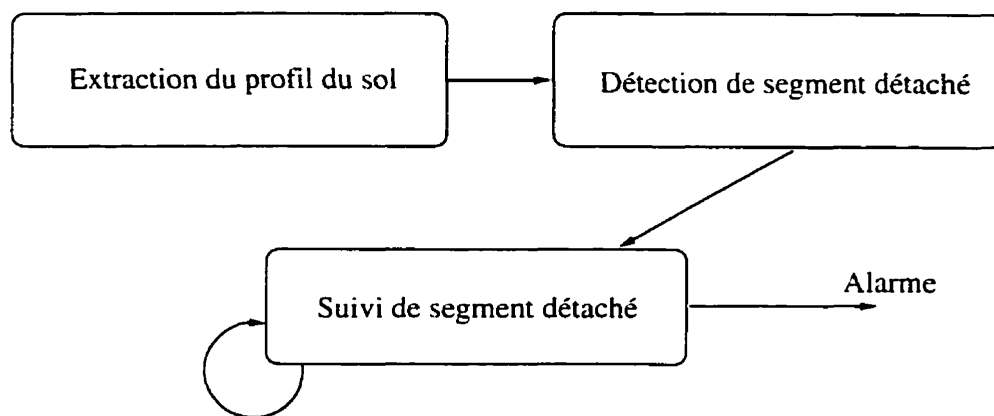


Figure 2.16 : Schéma bloc du suivi de l'obstacle dans l'image.

2. la détection d'un détachement de segment de ligne dans le plan image provoqué par une discontinuité dans la scène.
3. le suivi de ce détachement jusqu'à ce que sa distance avec le profil du sol soit supérieure à DM pour confirmation.

2.3.2.2 Extraction de la ligne du sol

Pour détecter un détachement, nous cherchons d'abord à identifier le profil du sol dans l'image. En supposant que ce profil soit faiblement déplacé entre deux itérations, (la vitesse de prise d'image étant élevée par rapport au basculement du véhicule) et que sa forme soit connue d'avance (par exemple une ligne droite), nous pouvons le chercher dans une fenêtre autour de son ancienne position (Figure 2.17). Il s'agit ici de déterminer l'équation de la droite qui approche au mieux les pixels blancs dans cette fenêtre. Pour augmenter la fiabilité des résultats, nous effectuons une deuxième recherche dans une fenêtre plus étroite, dans l'entourage de notre première estimation. La taille de la deuxième fenêtre de recherche est en fonction de l'écart moyen des pixels blancs trouvés dans la première fenêtre. L'algorithme plus détaillé est donné dans la section 3.3.

2.3.2.3 Détection et suivi de segment détaché

Pour détecter les nouveaux détachements dans une fenêtre qui dépasse de la position du profil du sol, on cherche l'ensemble des pixels blancs (Figure 2.18). Ensuite,

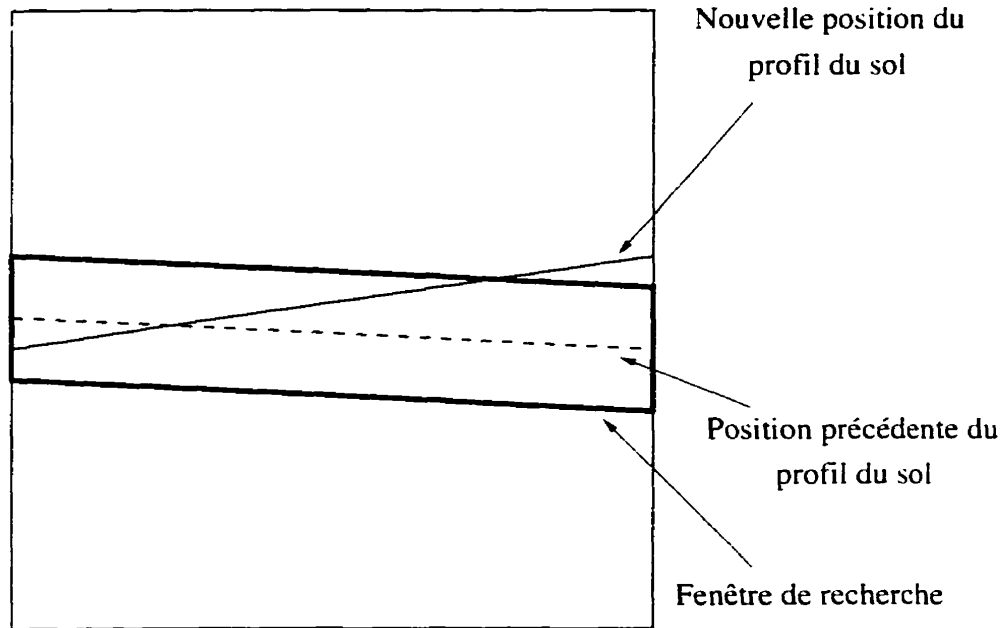


Figure 2.17 : Principe de recherche du profil du sol en utilisant sa position initiale dans l'image.

on calcule la valeur moyenne des positions verticales de ces pixels blancs pour obtenir la valeur y_i de la position verticale du segment détaché.

Pour suivre le déplacement de ces segments, on prédit la position $\hat{y}_i(t)$ de chaque segment dans l'image (Figure 2.19). Par la position $y_i(t - 1)$ de chaque segment détaché, on peut calculer la hauteur h_{t-1} , à laquelle le laser touche l'obstacle. h_{t-1} est obtenu en remplaçant p_y par $y_i(t - 1)$ dans l'équation 2.4.

Ensuite, en connaissant la vitesse du véhicule V et le nombre de trames par seconde N_t prises par la caméra, on peut déduire la nouvelle hauteur h_t à laquelle le

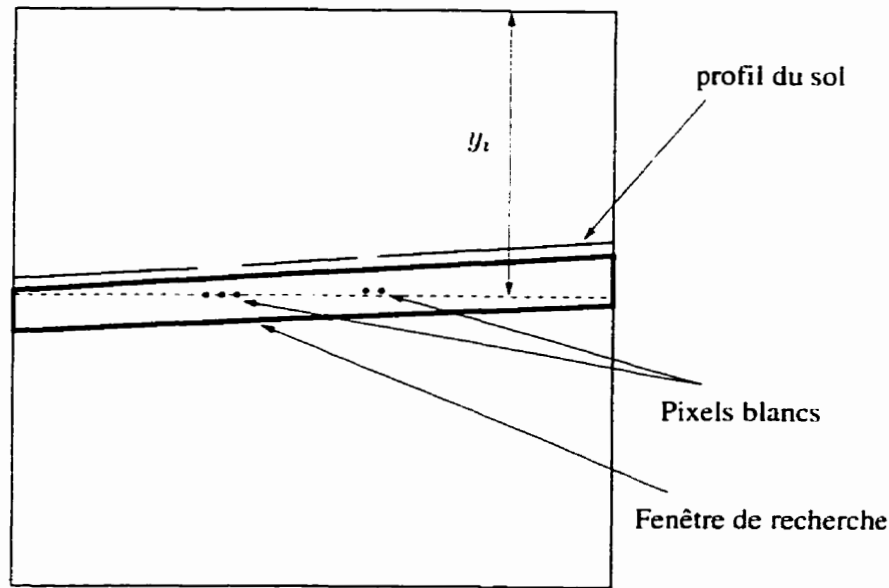


Figure 2.18 : Principe de détection des segments détachés.

laser touche l'obstacle par la relation :

$$h_t = h_{t-1} + \frac{V}{N_t \tan(\alpha_t)} \quad (2.7)$$

La position prédite du segment de ligne détaché $\hat{y}_i(t)$ est enfin calculée en remplaçant tout simplement h par h_t dans l'équation 2.6. La dernière étape consiste à effectuer une recherche dans une fenêtre autour de $\hat{y}_i(t)$ afin de déterminer la position réelle $y_i(t)$ du segment de ligne détaché. En fait, $y_i(t)$ correspond à la moyenne de toutes les valeurs p_y des pixels blancs dans cette fenêtre. Dès lors, si la distance entre $y_i(t)$ et le profil du sol est plus grande que "DM", l'alarme est déclenchée. La distance entre $y_i(t)$ et le profil du sol est obtenue en calculant la distance moyenne entre tous les pixels utilisés pour obtenir $y_i(t)$ et le profil du sol.

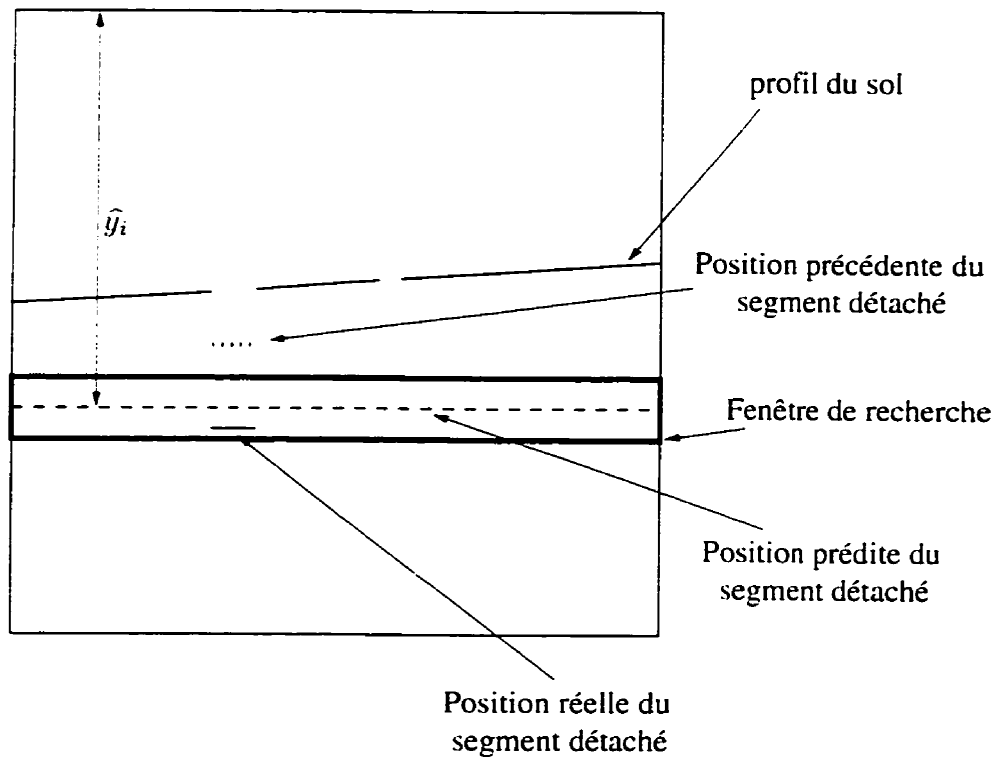


Figure 2.19 : Principe de suivi des segments détachés.

2.3.2.4 Cas des obstacles larges

Lorsqu'un obstacle large (ex. un véhicule) se présente devant le véhicule, la méthode présentée auparavant pour les obstacles de taille moyenne ne peut pas le détecter : le système ne peut différencier entre le profil d'un large obstacle et celui du sol (pas de détachement ou le profil du sol n'est pas significatif pour être détecté (Figure 2.20)). Pour palier à ce problème, nous avons choisi de projeter trois plans laser en avant du véhicule au lieu d'un seul. La méthode utilisée dans ce cas est de comparer la distance entre les lignes laser dans l'image. Quand les faisceaux laser tombent sur le sol, la distance entre les profils reste approximativement constante (malgré les

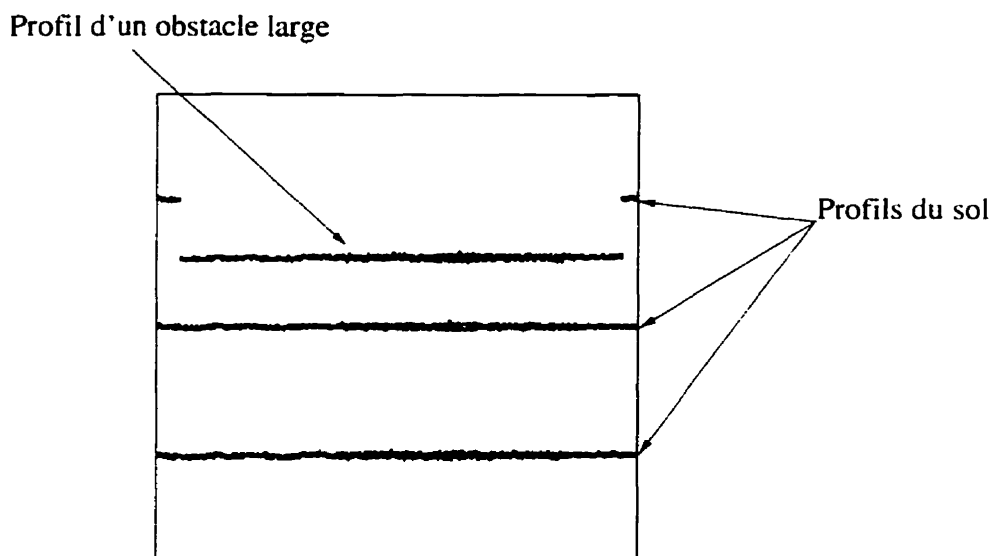


Figure 2.20 : Profil d'un obstacle large.

vibrations importantes du véhicule). Si un des plans laser touche un obstacle large, au fur et à mesure que le véhicule avance, le profil se déplace vers le bas de l'image et la distance de ce profil par rapport aux deux autres diminue. Dans le cas où cette distance est plus petite qu'un certain seuil, on avertit le système de navigation afin qu'il immobilise l'engin.

2.3.2.5 Utilisation de plusieurs plans lasers

L'ajout des deux autres plans laser renforce la validité des résultats. Lorsque le véhicule passe par-dessus un accident, le basculement fait passer le plan laser au-dessus de l'obstacle et le déplacement du véhicule pourra faire de sorte que le plan laser ne touchera plus l'obstacle même lorsque la roue du véhicule ne sera plus sur l'accident. Dans ce cas précis, l'obstacle n'est pas détecté. Ainsi, quand ces plans laser

sont ajoutés et que les bruits ou les vibrations du véhicule empêchent la détection d'un obstacle par le premier plan laser, les deux autres plans laser pourront malgré tout le détecter. La figure 2.21 illustre ce phénomène à l'aide de deux plans lasers (au lieu de trois). Par contre, cet ajout augmente le temps de traitement des images.

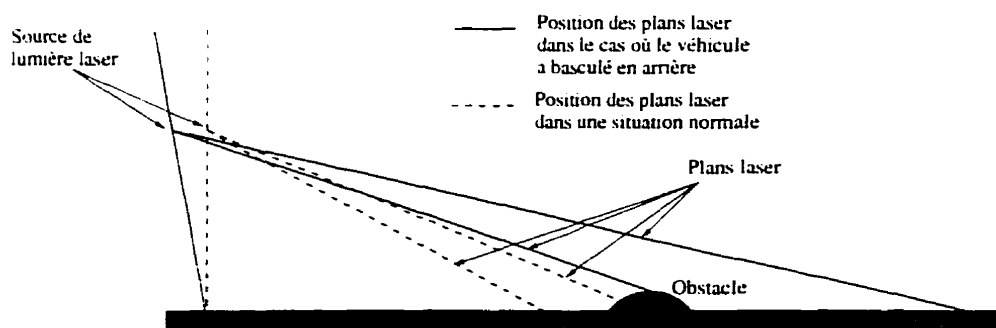


Figure 2.21 : Position des plans laser dans le cas d'un basculement du véhicule.

Jusqu'à présent, le système devait chercher un seul profil dans chaque image, alors que maintenant il doit traiter trois profils. De plus, si la distance entre les profils laser dans l'image n'est pas suffisamment importante, il est probable qu'un segment détaché entre dans le voisinage d'un autre profil et que celui-ci soit considéré comme un détachement d'un autre profil. La manière dont nous avons procédé pour résoudre ce problème a été de projeter les trois plans laser suffisamment éloignés l'un de l'autre pour que le système ne confonde pas les profils et les détachements dans l'image.

2.4 Choix des paramètres de configuration

2.4.1 Position et angle d'inclinaison de la source laser

Dans la section précédente, nous avons souligné l'importance du suivi, dans le plan image, de l'événement correspondant à un obstacle. Pour mener à bien cette tâche, nous devons prendre en compte deux éléments :

- l'évolution (rapide ou lente) de l'image de l'intersection de plan laser avec l'obstacle :
- le nombre de trames dans lesquelles l'événement correspondant à un même obstacle est observé.

Le nombre minimum de trames NV_{min} dans lesquelles un même obstacle de hauteur h est observable est donné par :

$$NV_{min} = \left\lceil \frac{h \times N_t}{V} \tan(\alpha_l) \right\rceil \quad (2.8)$$

Ainsi, en analysant la relation 2.8, nous pouvons déduire que l'augmentation de l'angle d'inclinaison α_l du laser vers 90° fait augmenter NV_{min} tandis que ce changement (l'augmentation de α_l) fait tendre h vers H_l (voir l'équation 2.4). C'est-à-dire pour α_l proche de 90° , l'évolution du profil de l'obstacle dans l'image sera très faible.

Le tableau 2.1 décrit NV_{min} et H_l en fonction de α_l pour les valeurs suivantes :

$V = 450 \text{ cm/sec}$, $N_t = 60 \text{ trames/sec}$, $h = 20 \text{ cm}$ et $D_{min} = 650 \text{ cm}$ (distance minimale

où l'obstacle doit être détecté).

Tableau 2.1 : Nombre d'images dans lesquelles un obstacle de 20 cm. aperçu à 650 cm. est observable (variable libre : α_l : H_l indique la hauteur correspondante de la diode laser).

α_l	70	71	72	73	74	75	76	77	78
NV_{min}	8	8	9	9	10	10	11	12	13
H_l	256.5	243.8	231.1	218.7	206.3	194.1	182.0	170.0	158.1
α_l	79	80	81	82	83	84	85	86	87
NV_{min}	14	16	17	19	22	26	31	39	51
H_l	146.3	134.6	122.9	111.3	99.8	88.3	76.8	61.9	51.4

Avant de choisir l'angle d'inclinaison du laser, nous devons prendre en compte le fait que le laser doit être placé au-dessus de la caméra (voir la section 2.2). Dans notre simulation, nous avons supposé que la caméra était placée à 210 cm du sol. Cette valeur est choisie en fonction de la hauteur du plafond par rapport au sol. Nous supposons que la hauteur du plafond est de 250 cm du sol et que l'amplitude des vibrations du véhicule est de 10 cm au maximum. Les valeurs possibles pour α_l seront donc supérieures ou égales à 74° . Par une série d'expérimentations que nous avons menées, nous avons remarqué qu'en choisissant $\alpha_l = 78^\circ$ et $H_l = 160\text{cm}$, les résultats sont satisfaisants.

2.4.2 Champ de vision de la diode laser

La bande de sécurité est l'espace latéral dont le véhicule a besoin pour circuler. Le système de détection d'obstacles doit assurer que cette région soit libre d'obstacles.

La largeur W_b de cette bande dépend de la forme de la trajectoire (ligne droite ou virage) et de la forme du véhicule (véhicule articulé ou non). Dans une ligne droite, cette largeur peut être tout simplement celle du véhicule. Elle doit être plus grande dans les virages. Ceci est dû au fait que le centre d'essieu arrière du véhicule ne suit pas la même trajectoire que le centre d'essieu avant.

Dans cette application, nous avons choisi une largeur totale du véhicule $L_v = 240$ cm. La largeur de la bande de sécurité a été fixée à $W_b = 260$ cm.

L'angle d'ouverture de la diode laser β doit être assez grand pour que toute la largeur de la bande de sécurité soit éclairée. Par un simple calcul, nous obtenons :

$$\beta = 2 \arctan \left(\frac{\cos(\alpha_l) W_b}{2 \times H_l} \right) \quad (2.9)$$

La valeur retenue pour β est de 43° .

2.5 Problèmes de visibilité

2.5.1 Régions non visibles

Comme illustré dans la figure 2.22, lorsque le véhicule s'approche d'un virage, il est possible qu'une partie de la bande de sécurité ⁴ ne soit pas balayée par l'extrémité du laser. Dans la section 2.3.2, nous avons expliqué que notre application se base sur l'évolution temporelle de l'obstacle dans l'image pour le détecter et non pas sur les

⁴nous nous intéressons seulement à cette région, voir section 2.4.2

mesures ⁵ prises à chaque instant. Cela nous impose de couvrir adéquatement la zone de bande de sécurité par l'extrémité du laser afin d'assurer la sécurité de véhicule. Le problème de région non visible ne surgit que dans les virages. En effet, le laser est projeté trop loin et, avant que le véhicule n'aborde un virage, l'extrémité du laser ne se situe plus à l'extérieur de la bande de sécurité. La surface de cette région non visible dépend de la distance à laquelle on projette le laser et de l'angle de courbure de la trajectoire. Étant donné que ces régions ne peuvent être négligées, quelques alternatives peuvent être considérées pour palier à ce problème :

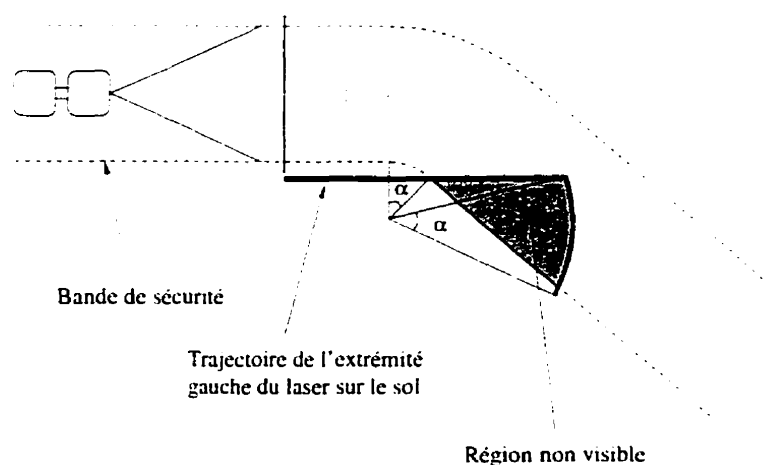


Figure 2.22 : Exemple de région non visible.

- Implanter un système qui est capable de prédire la trajectoire qui va être empruntée par le véhicule (soit, par des indices visuels : soit, par mémorisation du trajet), et selon les courbures des virages, changer au besoin l'angle d'orientation du capteur. Néanmoins, pour que ce système soit efficace, il est nécessaire

⁵les mesures sont : la position de l'obstacle par rapport au véhicule et sa hauteur.

de placer des systèmes d'odométrie précis sur le véhicule, afin d'avoir une bonne estimation de la position du véhicule dans les galeries. Il faudra aussi une plateforme mobile qui portera le système de détection d'obstacles afin de bien orienter le senseur.

- La deuxième solution consiste à implanter une technique qui diminuera l'angle d'inclinaison du système (caméra et laser) juste avant d'aborder un virage. Dans ce cas, la vitesse du véhicule doit être réduite proportionnellement, car une fois l'angle du système diminué, la distance de vision est plus courte, et par conséquent, le temps de freinage doit aussi être plus court. Le handicap de cette solution est que dans les virages la vitesse du véhicule doit être réduite pour que toute la largeur de la bande de sécurité soit balayée par le système.

De surcroît, le véhicule subissant des vibrations assez élevées dans les environnements miniers, un système mobile devient alors très fragile. Il est à noter aussi que ce système étant un système de sécurité, il doit être le plus autonome possible et ne doit pas être conditionné par des informations externes (trajet connu, mesures odométriques, etc.), ce qui exclut les deux solutions apportées auparavant.

- La méthode que nous avons adoptée consiste à combiner deux autres systèmes (caméra, lasers et système de traitement) de façon à ce que chaque système puisse surveiller une région différente qui lui est propre.

L'inconvénient de cette méthode, hormis le coût élevé, est la difficulté de prise de décision, car il est possible par exemple que le système de gauche ait détecté un obstacle alors que le véhicule ne se dirige pas dans cette direction. Pour palier à ce problème, il faudra que le système de détection d'obstacles soit informé de la position du véhicule dans la galerie et aussi, le trajet qui va être emprunté par le véhicule. De cette manière, selon les cas, seulement l'information d'un des trois sous-systèmes sera prise en considération.

2.5.2 Régions occultées

Le deuxième problème qui surgit dans les virages concerne les régions occultées. En effet, à cause de la géométrie d'un virage, une partie de la zone de la bande de sécurité peut se trouver occultée par les coins des parois (Figure 2.23).

La première solution à ce problème consiste à planifier le trajet du véhicule de sorte

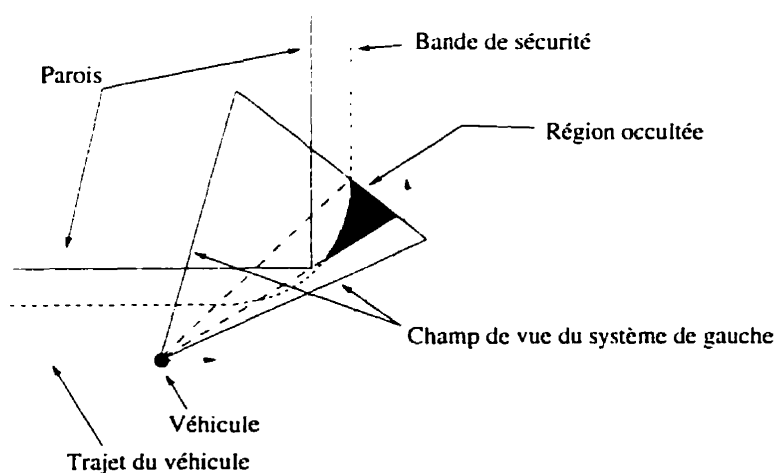


Figure 2.23 : Région occultée du système de télémètre gauche.

qu'il s'éloigne des parois et d'éliminer ainsi ces régions cachées par les parois. Mais, comme dans les galeries minières l'espace disponible est restreint, on est amené à imposer plutôt certaines conditions sur la forme de ces parois. Nous présentons une méthode par laquelle on définit la forme des parois dans les virages afin que les zones cachées soient à l'extérieur de la bande de sécurité. Le paramètre à déterminer pour une trajectoire définie consiste à calculer la profondeur de mur qui doit être enlevée du coin du virage (en supposant qu'il était rectangulaire au départ) pour que tout point dans la bande de sécurité soit balayé par un des systèmes. Autrement en se référant à la figure 2.24, on cherche à déterminer les valeurs OC_1 et OC_2 .

Pour résoudre ce problème, on simule premièrement l'environnement et le trajet du

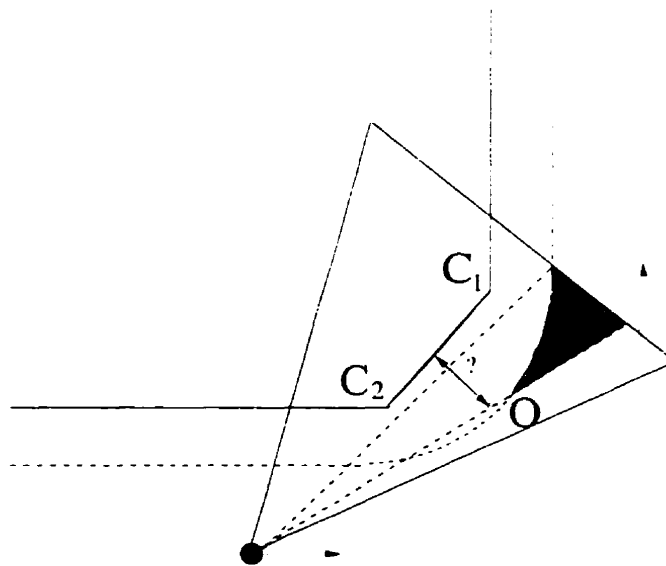


Figure 2.24 : Solution au problème de région occultée.

véhicule dans cet environnement. Ensuite, on marque sur une carte tous les points vus

par les extrémités du laser. On y inscrit également la position de la bande de sécurité et la position des parois. Dès lors, on cherche les points d'intersection entre les plans laser et les parois. De cette façon, il est possible de définir la profondeur de la paroi à enlever au coin du virage pour que le système fonctionne convenablement. Pour mieux expliquer cette procédure, nous avons choisi un exemple⁶. Dans cet exemple, le problème d'occlusion ne se pose que dans le sous-système de gauche. Les paramètres

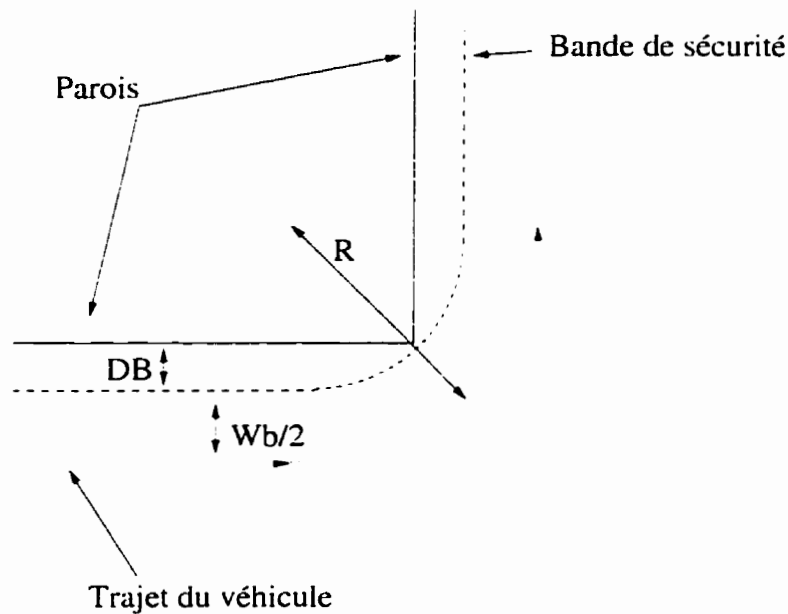


Figure 2.25 : Virage simulé.

suivants sont choisis (Figure 2.25) :

- Angle de virage : 90° (à gauche).
- Distance DB entre la paroi et la bande de sécurité : 120 cm.
- La largeur W_b de la bande de sécurité : 130 cm.

⁶Cet exemple est utilisé aussi dans la simulation du système.

- Angle α_l d'inclinaison du laser : 80° .
- Hauteur H_l à laquelle le laser est placé : 160 cm
- Distance $L = \tan(\alpha_l)H_l$ à laquelle le laser est projeté : 907 cm
- Rayon R de courbure du virage : 450 cm

La figure 2.26 va servir de base à la définition du problème.

Étant donné que la distance L à laquelle le laser est projeté est plus grande que le rayon de courbure R du virage, le premier contact de la ligne laser R_y avec la frontière de la bande sécurité se fera lorsque le véhicule se trouvera à une distance L de la bande de sécurité (Figure 2.26). A l'instant $t = 0$, la position du véhicule est donc :

$$P_V(t = 0) = \left(DB - L, -\frac{W_b}{2} - DB \right)^T \quad (2.10)$$

et :

$$P_B(t = 0) = \left(DB, L \tan\left(\frac{\beta}{2}\right) - DB - \frac{W_b}{2} \right)^T \quad (2.11)$$

À un instant t quelconque, on a :

$$P_V(t) = \left(DB - L + \Delta x, -\frac{W_b}{2} - DB \right)^T \quad (2.12)$$

et :

$$P_B(t) = \left(DB, L \tan\left(\frac{\beta}{2}\right) - DB - \frac{W_b}{2} + \Delta x \cotan(\beta) \right)^T \quad (2.13)$$

Il est alors possible de calculer à chaque instant la pente $Pe(t)$ de la droite qui relie

- O : Coin du virage et origine du repère monde dans cet exemple.
- β : Angle d'ouverture du champ de vue des trois systèmes. C'est aussi l'angle d'orientation du sous-système de gauche.
- R_y : Rayon situé le plus à gauche parmi les rayons dans la série des rayons projetés de la source laser et qui touche l'extrémité de la bande de sécurité.
- P_B : Point d'intersection entre R_y et l'extrémité de la bande de sécurité.
- A : Point d'intersection entre R_y et la paroi A.
- B : Point d'intersection entre R_y et la paroi B.
- P_v : Position du véhicule.
- Δx : Déplacement du véhicule sur l'axe x.

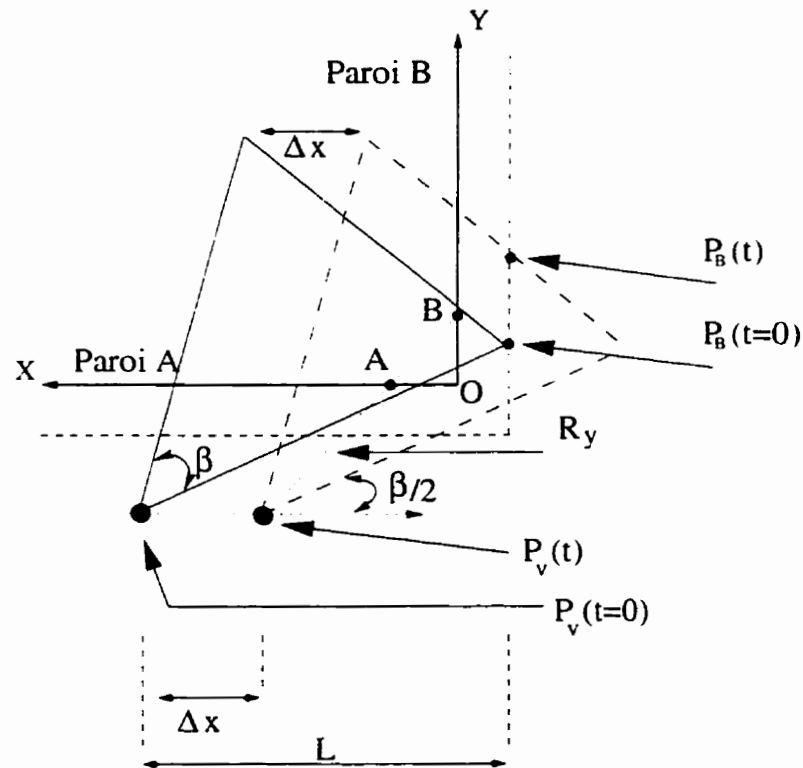


Figure 2.26 : Description des paramètres pour résoudre le problème des régions occultées.

les points $P_V(t)$ et $P_B(t)$:

$$Pe(t) = \frac{L \tan(\beta/2) + \Delta x \cotan(\beta)}{L - \Delta x} \quad (2.14)$$

Or,

$$\begin{cases} OA = -(DB - L + \Delta x) - \frac{DB + W_b/2}{Pe(t)} \\ OB = -(DB - L + \Delta x) \times Pe(t) - DB - W_b/2 \end{cases} \quad (2.15)$$

Il est possible de chercher pour quelle valeur Δx_A de Δx , OA est maximum et pour quelle valeur Δx_B de Δx , OB est maximum. En calculant $\frac{\partial OB}{\partial \Delta x} = 0$ et $\frac{\partial OA}{\partial \Delta x} = 0$, nous obtenons :

$$\begin{cases} \Delta x_A = \sqrt{(DB + \frac{W_b}{2})(L \tan^2(\beta) \tan(\frac{\beta}{2}) + L \tan(\beta)) - L \tan(\frac{\beta}{2}) \tan(\beta)} \\ \Delta x_B = L - \sqrt{DB \left(1 + \tan(\frac{\beta}{2}) \tan(\beta)\right) L} \end{cases} \quad (2.16)$$

Les valeurs trouvées pour cet exemple sont $\Delta x_A = 132$ cm, $OA_{max} = 274$ cm et $\Delta x_B = 467$ cm, $OB_{max} = 313$ cm. Étant donné que le système est symétrique,

$$OC_1 = OC_2 = \max(OA_{max}, OB_{max}) \quad (2.17)$$

Dans notre simulation, nous avons choisi $OC_1 = OC_2 = 350$ cm.

2.5.3 Apparence des parois dans l'image

Le dernier problème qui doit être pris en considération concerne la présence des parois dans le champ de vue du système. Comme le système proposé est conçu de manière à pouvoir détecter dans un environnement immédiat tout objet assez grand, il se peut que dans un virage ou à une intersection, il interprète les parois comme des obstacles (Figure 2.27). La solution à ce problème sera d'informer à l'avance le

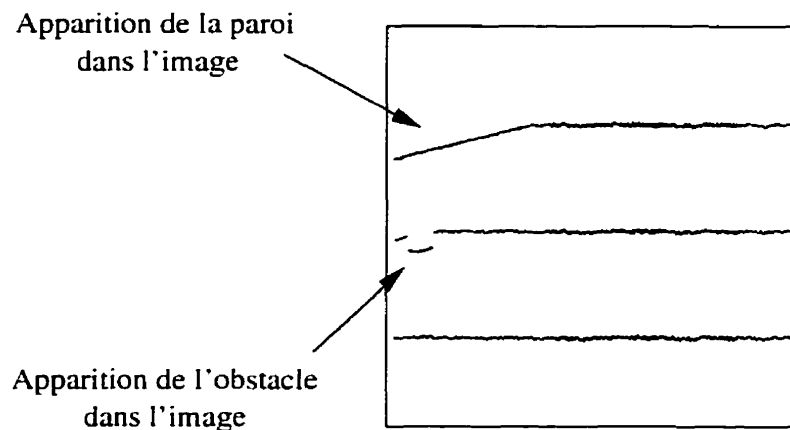


Figure 2.27 : Apparence d'un obstacle et d'une paroi dans l'image.

système de la position des parois par rapport au véhicule pour que celui-ci puisse les différencier des obstacles. Nous avons, ici aussi, choisi un exemple⁷ pour mieux expliquer cette procédure. Cet exemple concerne le problème d'apparition d'une paroi dans l'image du sous-système de droite comme illustré à la figure 2.28. Nous cherchons à déterminer la partie dans l'image qui ne devrait pas être traitée, c'est-à-dire la région dans laquelle la détection de nouveaux obstacles et le suivi d'obstacles ne devraient

⁷Cet exemple est utilisé aussi dans la simulation du système.

pas se faire. Les paramètres choisis dans cet exemple sont identiques aux paramètres choisis dans la section précédente. Au long de cet exemple, nous supposons que par un système placé sur le véhicule, on peut obtenir ces deux informations : l'angle α d'orientation du véhicule et la distance D du véhicule à la paroi. Nous cherchons

- EOF : champ de vue du laser dans le système de droite.
- D_1 : bissectrice de EOF
- D_2 : droite qui passe par EF .
- D_3 : paroi.
- point A : intersection des droites D_1 et D_2 .
- point B : intersection de l'axe Z du véhicule et de la droite D_3 .
- point C : intersection des droites D_2 et D_3 .

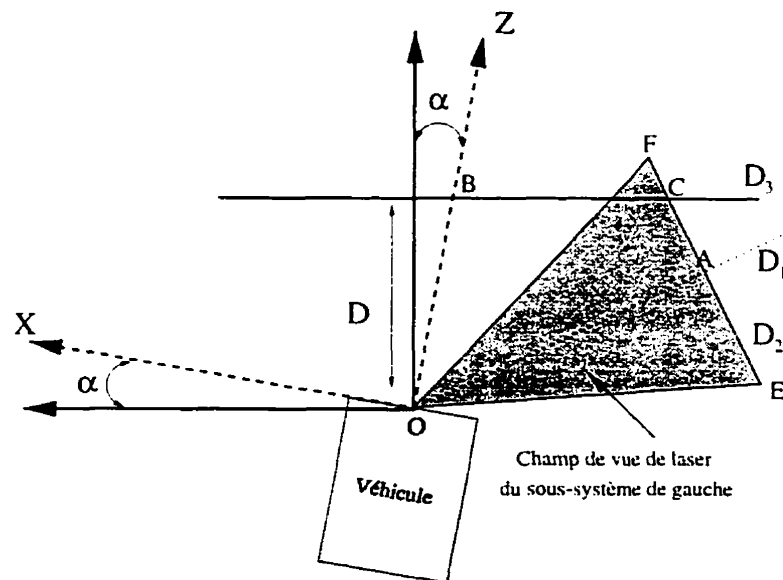


Figure 2.28 : Description des paramètres pour le problème d'apparence de parois dans l'image.

à déterminer P_{C_x} , la coordonnée en X de la projection dans l'image (repère R_p) du point C dans l'image (Figure 2.28). Pour obtenir la valeur de P_{C_x} , nous calculons tout d'abord les coordonnées $(X_C, Y_C, Z_C)^T$ du point C dans le repère R_v du véhicule.

En utilisant les transformations décrites dans la section 2.1.1, P_{C_x} est ensuite calculé.

L'équation de la droite D_1 est :

$$Z = -\tan(90 - \beta)X = -\cotan(\beta)X \quad (2.18)$$

et le point A a comme coordonnées dans le plan (X, Z) :

$$A = (-L \sin(\beta), L \cos(\beta))^T \quad (2.19)$$

donc l'équation de la droite D_2 qui passe par A et est perpendiculaire à la droite D_1

est :

$$Z = \tan(\beta)X + \frac{L}{\cos(\beta)} \quad (2.20)$$

le point B a comme coordonnées dans le plan (X, Z) :

$$B = \left(0, \frac{D}{\cos(\alpha)}\right)^T \quad (2.21)$$

donc l'équation de la droite D_3 est :

$$Z = -\tan(\alpha)X + \frac{D}{\cos(\alpha)} \quad (2.22)$$

et C a comme coordonnées dans le repère R_v du véhicule :

$$\begin{cases} X_C = \frac{D \cos(\beta) - L \cos(\alpha)}{(\tan(\beta) + \tan(\alpha)) \cos(\alpha) \cos(\beta)} \\ Y_C = 0 \\ Z_C = X_C \tan(\alpha) + \frac{D}{\cos(\alpha)} \end{cases} \quad (2.23)$$

Finalement en utilisant $T = T_{ip} \times T_{\alpha} \times T_{lc} \times T_{vt}$, nous obtenons P_{C_r} dans le repère pixel R_p :

$$P_{C_r} = \frac{Np_x}{2} - \frac{Z_C \sin(\beta) - X_C \cos(\beta)}{(Z_C \cos(\beta) + X_C \sin(\beta)) \sin(\alpha_c) + \cos(\alpha_c) H_c} \times \frac{f_x}{Dp} \quad (2.24)$$

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, le principe général du système de détection d'obstacles, sa structure et ses caractéristiques géométriques ont été discutés.

L'emplacement de la caméra et du laser sur le véhicule a d'abord été choisi. Une série d'analyses a ensuite montré qu'un suivi d'obstacles était indispensable si l'on voulait un système robuste. L'algorithme permettant ce suivi a alors été décrit succinctement. Enfin, ce chapitre a présenté la résolution des trois problèmes liés à la géométrie du système et à l'environnement : ceux des régions non visibles, des régions occultées et l'apparition de parois dans l'image. Ces problèmes sont liés à la nécessité d'avoir un système qui est fonctionnel dans des situations de virage.

Le chapitre suivant détaille le système répondant à toutes les exigences présentées ici.

Chapitre 3

Système de détection d'obstacles : analyse détaillée

Dans ce chapitre, nous présentons l'algorithme complet du système. La figure 3.1 montre le schéma-bloc du système. Celui-ci a été divisé en cinq modules différents :

- un module de pré-traitement d'images dont le rôle est de préparer les images fournies par les senseurs afin de faciliter les traitements et l'interprétation ultérieurs.
- un module de détection de la ligne du sol produite par l'intersection de chaque plan laser avec le sol.
- un module de détection des segments détachés susceptibles de provenir d'un obstacle situé à l'avant du véhicule.

- un module de suivi des segments détachés dont le rôle est de confirmer l'origine de tels segments et ainsi accroître la robustesse face aux fausses alarmes.
- un module de prise de décision, déclenchant une alarme dans l'éventualité d'un obstacle de taille dangereuse.

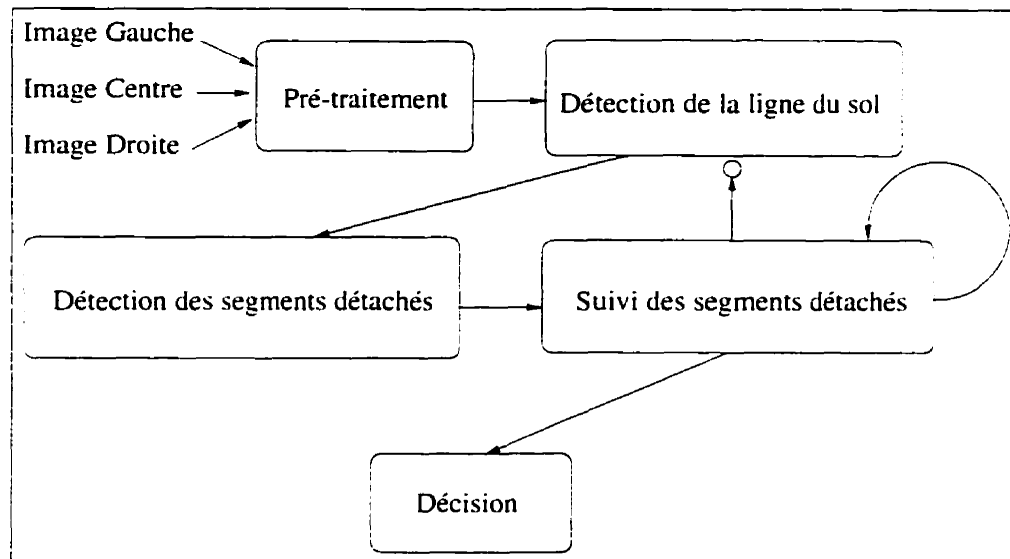


Figure 3.1 : Schéma-bloc général du système

Dans les sections suivantes, chaque module est analysé de façon systématique. Avant paravant nous décrirons, les structures de données communes à tous les modules.

3.1 Structure des données

Pour mémoriser les caractéristiques de chacun des neuf profils provenant des trois images (Droite, Centre et Gauche), on utilise la structure $Ligne_{ij}$. Les éléments D_{ij} , O_{ij} et C_{ij} de cette structure sont détaillés ci-dessous (Figure 3.2) :

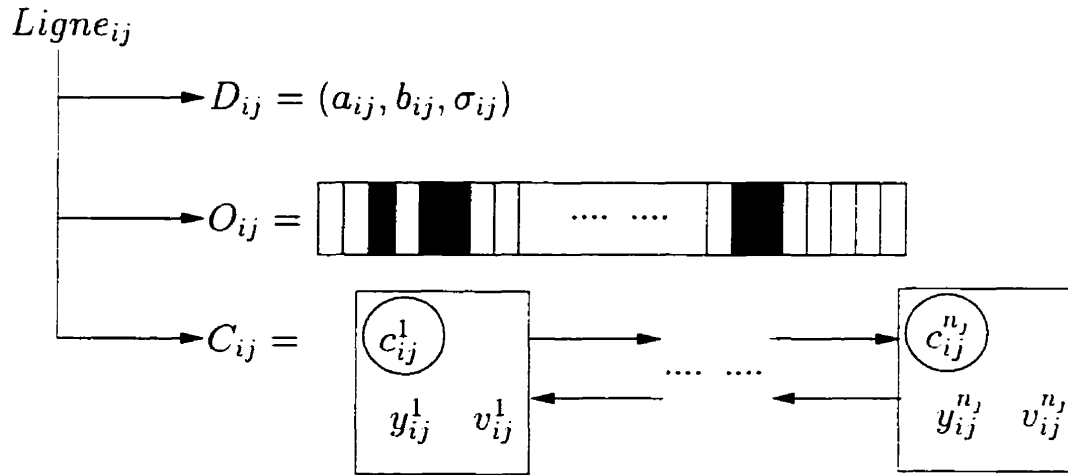


Figure 3.2 : Structure de la $Ligne_{ij}$

- D_{ij} contient les paramètres a_{ij} et b_{ij} de l'équation linéaire de la droite qui approche le profil laser j ($j = 1, 2$ et 3) $y = a_{ij}x + b_{ij}$ dans le plan d'image i (i prend les valeurs Droite, Centre ou Gauche) ainsi que l'écart moyen (σ_{ij}) des pixels blancs dans une fenêtre autour de cette droite. Où :

$$\sigma_{ij} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{s=1}^N (y_s - a_{ij}x_s - b_{ij})^2} \quad (3.1)$$

N est le nombre de pixels blancs trouvés dans la fenêtre de recherche et (x_s, y_s) sont les coordonnées d'un pixel blanc trouvé dans la fenêtre de recherche dans le repère R_p .

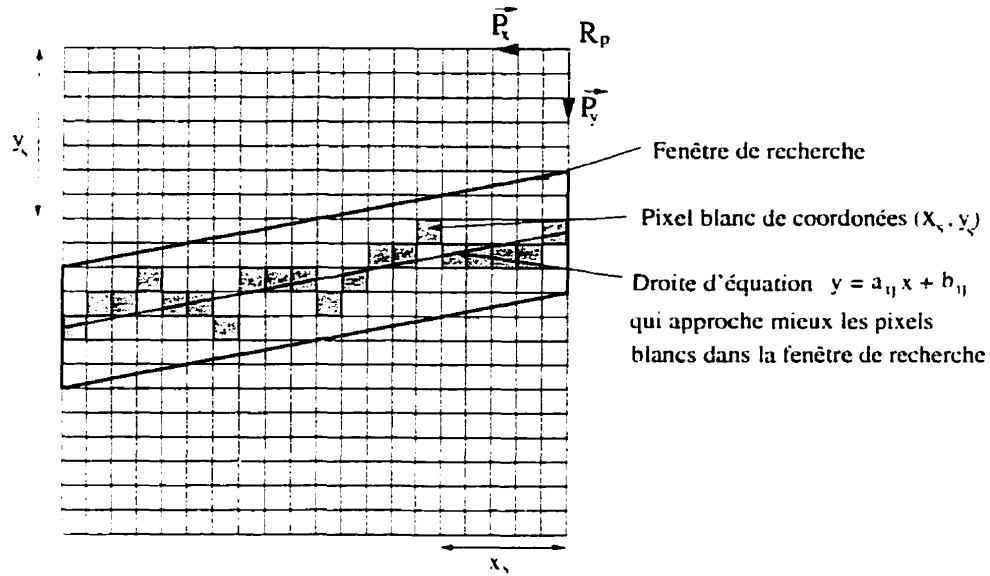


Figure 3.3 : Description des paramètres de la droite D_{ij} .

- O_{ij} (obstacle) est un vecteur binaire qui indique la position des parties détachées de la ligne laser correspondant aux obstacles. Chaque bit dans O_{ij} représente une colonne de l'image pré-traitée I_{pt} et vaut "1" si celle-ci contient un détachement et "0" si cette colonne ne contient pas de détachement (Figure 3.4).
- C_{ij} pointe sur une série de cellules c_{ij}^k , $k = 1 \dots n_j$ dont n_j est le nombre de segments détachés détectés de la ligne j . Si $n_j = 0$, C_{ij} ne contient aucune cellule. Chaque cellule c_{ij}^k contient la position verticale y_{ij}^k du segment détaché dans l'image (correspondant à la hauteur de l'obstacle) et le paramètre v_{ij}^k qui

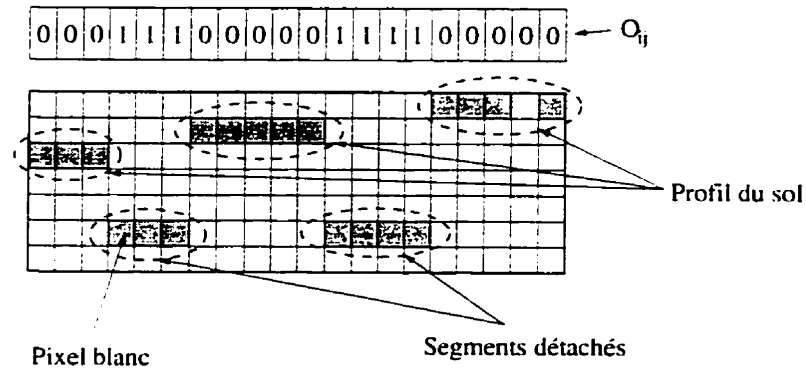


Figure 3.4 : Exemple des valeurs attribuées aux bits de O_{ij} correspondant à une image d'une ligne laser.

mémorise la distance parcourue par le véhicule depuis le moment où ce détachement a été perdu de vue (v_{ij}^k est égale à zéro si le segment détaché est visible). La cellule c_{ij}^k est ajoutée dès qu'un détachement est détecté, et on efface cette cellule si v_{ij}^k atteint un seuil (50 dans notre cas). Par exemple, la figure 3.5 montre une image fournie par le sous-système de centre, pour $n_1 = 0$, $n_2 = 1$, et $n_3 = 2$.

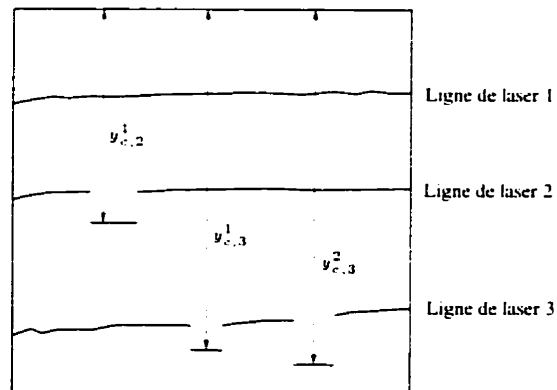


Figure 3.5 : Exemple des valeurs de $y_{c,j}^k, j = 1, 2, 3$.

3.2 Pré-traitement des images

Les images acquises par les caméras sont sujettes au bruit. Un pré-traitement de chaque image est donc essentiel pour obtenir des profils lasers plus nets et par conséquent une meilleure possibilité d'interprétation. Sur chaque image acquise par un des trois sous-systèmes (Droite, Centre et Gauche), on applique les trois procédures illustrées à la figure 3.6 et décrites dans les paragraphes qui suivent.

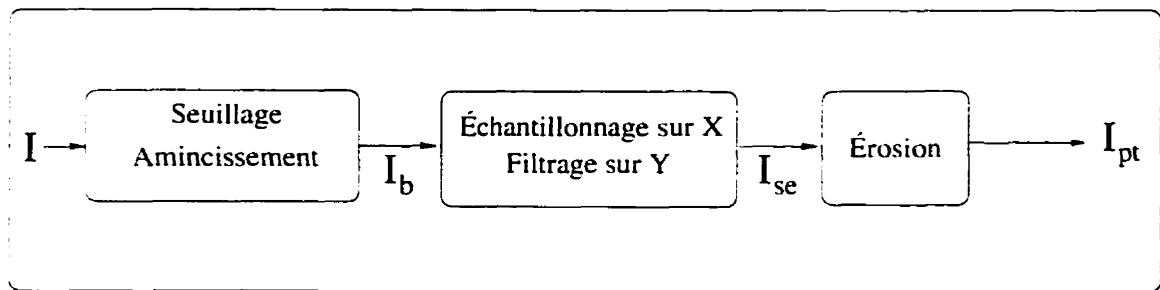


Figure 3.6 : Schéma-bloc du module de pré-traitement d'image.

3.2.1 Seuillage et amincissement

Cette étape consiste à réduire la ligne laser à un seul pixel dans chaque colonne. La méthode choisie doit dépendre de la forme des lignes dans l'image. Comme dans les environnements miniers en général il n'y a pas de source de lumière puissante qui interfère, ces lignes sont faciles à distinguer. Un filtrage préalable n'est donc pas nécessaire. Deux méthodes d'amincissement de ligne peuvent être envisagées.

Méthode #1 Dans le cas le plus général, l'image de la ligne laser occupe plus de 3 pixels et le profil transversal d'intensité lumineuse peut ne pas être gaussien (Figure 3.7). Dans ce cas, l'amincissement consiste à trouver la position où l'intensité du laser

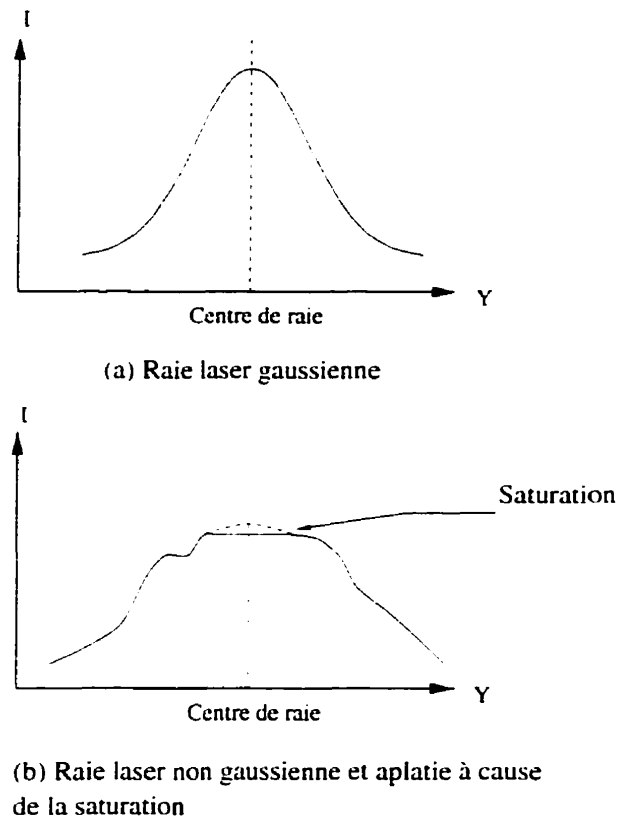


Figure 3.7 : Problématique pour la ligne laser dans l'image

est maximum¹. Un second problème qui doit être pris en compte est la saturation dans l'image. Ce problème surgit lorsque la distance de la scène au laser est faible ou lorsque l'albédo des surfaces éclairées est élevé. La position où l'intensité est maximale est alors indéterminée comme illustré à la figure 3.7(b). La solution proposée pour trouver

¹Dans ce cas, l'étape de seuillage (ou binarisation de l'image) va être placée après l'amincissement afin de conserver toute l'information dans l'image.

la position du maximum dans toutes les situations est illustrée à la figure 3.8. Afin de

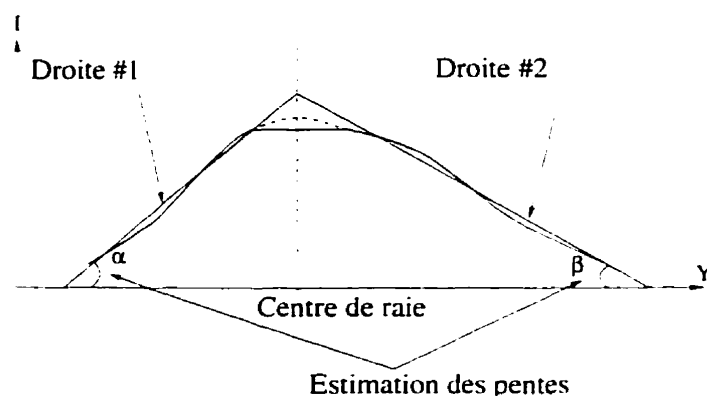


Figure 3.8 : Méthode d'estimation du centre de la raie laser dans l'image.

trouver la position de ce maximum, nous cherchons les équations $I = \tan(\alpha)Y + b_1$ et $I = \tan(\beta)Y + b_2$ des droites qui représentent le mieux les valeurs d'intensité des pixels blancs. A partir de là, la position M où l'intensité est à son maximum est donnée par :

$$M = \frac{b_2 - b_1}{a_1 - a_2} = \frac{b_2 - b_1}{\tan(\alpha) + \tan(\beta)} \quad (3.2)$$

Méthode #2 Même si la méthode présentée auparavant est plus générale et semble être plus robuste, nous avons choisi une approche qui commence par une binarisation de l'image en effectuant un seuillage : chaque pixel blanc (valeur différente de zéro dans la matrice d'image) prend la valeur "1" (ou "blanc") si son intensité est plus grande que le "seuil" et "0" (ou "noir") sinon. Ensuite, une recherche verticale est effectuée pour trouver des ensembles de pixels blancs verticalement adjacents : on autorise jusqu'à deux pixels noirs entre deux pixels blancs (Figure 3.9(b)). La

position p_y de chacun de ces ensembles dans le repère R_p est retenue. La moyenne de ces positions est alors calculée et retournée comme la position de la ligne dans cette colonne (Figure 3.9). Afin d'avoir un système plus rapide, ces deux opérations

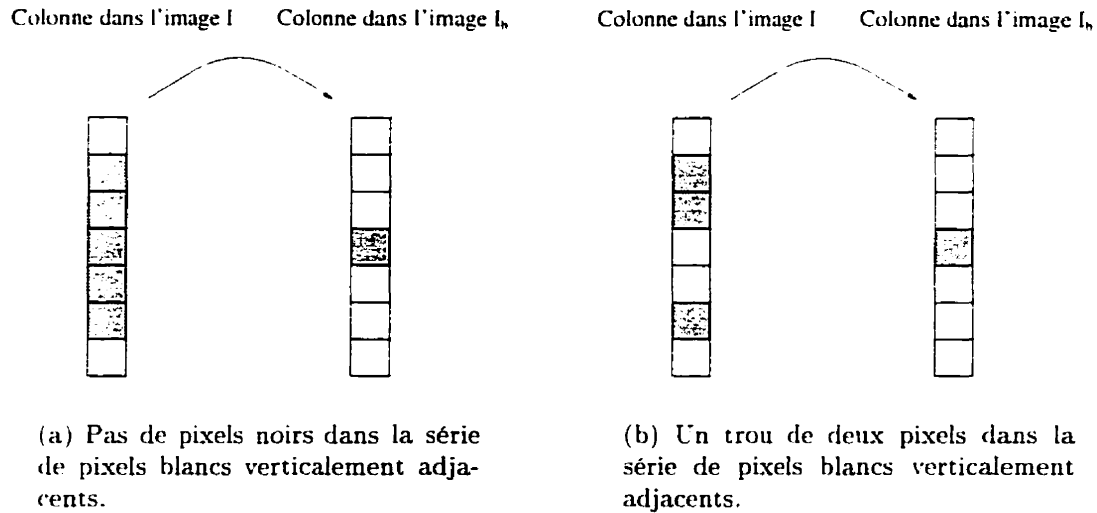


Figure 3.9 : Exemple de processus d'amincissement implanté.

(Seuillage et Amincissement) sont effectuées simultanément. Dans le cas où l'image de la ligne laser occupe plus de 3 pixels, cette méthode peut induire des erreurs dans l'estimation de la position de son centre. Pour y remédier tout en évitant d'avoir recours à la première méthode, nous supposons qu'il est possible d'ajuster les lentilles des lasers de sorte à pouvoir résoudre les cas difficiles.

3.2.2 Échantillonnage et filtrage

Une fois l'image binaire I_b obtenue, nous cherchons ici à l'améliorer tout en gardant le plus d'information possible. A cause de la rugosité du sol et de la sensibilité

du système, les profils laser obtenus ne sont pas rectilignes. Pour remédier à ce problème, nous pourrions envisager de sous-échantillonner la résolution totale du profil en regroupant plusieurs pixels de I_b dans une fenêtre. La fenêtre utilisée est de 5 par 3. Elle échantillonne selon X et filtre selon Y. Ceci est réalisé par un déplacement horizontal de 5 pixels à chaque itération et un déplacement vertical d'un pixel à chaque retour à la ligne (Figure 3.10). Ainsi, avec une image I_b de départ de 512

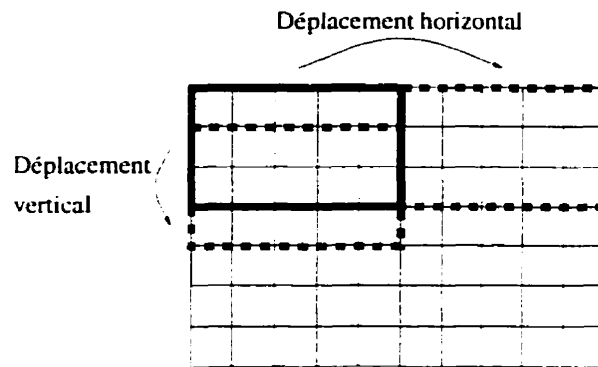


Figure 3.10 : Principe de déplacement de la fenêtre dans l'image pour échantillonnage et filtrage.

par 512 pixels, on obtient après le sous-échantillonnage, une image I_{se} de 102×510 super-pixels. Comme l'image originale a subi un pré-traitement, on peut supposer que chaque colonne de la fenêtre contient au maximum un pixel blanc. L'algorithme qui consiste à attribuer 0 ou 1 à chaque super-pixel de I_{se} est le suivant :

1. Compter le nombre N de pixels blancs dans la fenêtre correspondante de l'image

I_b .

2. Si $N < 3$ retourner 0.

3. Si $N > 3$ retourner 1.

4. Cas où $N = 3$

- Si les colonnes qui ont des pixels blancs ne sont pas adjacentes, on assigne une valeur 0.
- Si les trois colonnes sont adjacentes, on code la position des pixels blancs dans chaque colonne de la façon suivante:
 - (a) si le pixel blanc est dans la première ligne.
 - (b) si le pixel blanc est dans la deuxième ligne.
 - (c) si le pixel blanc est dans la troisième ligne.

On utilise le tableau ci-dessous pour attribuer une valeur (0 ou 1) au super-pixel.

Tableau 3.1 : Valeur attribuée au Super-pixel en fonction des positions codées des pixels blancs, dans la fenêtre d'échantillonnage et filtrage.

code	Super-pixel	code	Super-pixel	code	Super-pixel
111	1	211	1	311	0
112	1	212	1	312	0
113	0	213	1	313	0
121	1	221	1	321	1
122	1	222	1	322	1
123	1	223	1	323	1
131	0	231	0	331	0
132	0	232	1	332	1
133	0	233	1	333	1

3.2.3 Érosion

La dernière étape du pré-traitement d'image est l'érosion. Le but de cette fonction est d'éliminer les traces des parois dans le cas où le véhicule se déplace parallèlement aux parois. Au lieu d'implanter une méthode qui soit capable de distinguer entre les parois et les obstacles, on applique plutôt à chaque image la fonction d'érosion. La méthode est la suivante : l'image est balayée de gauche à droite et de haut en bas, chaque pixel blanc n'ayant pas d'autres pixels blancs dans son voisinage immédiat (dans les 8 pixels voisins) prend la valeur 0 (ou noir).

Le résultat de pré-traitement d'une image peut être consulté à la figure 3.11.

3.2.4 Élimination de la partie d'image qui correspond aux parois

Lorsque le véhicule s'approche d'une intersection, une paroi de la galerie peut être interprétée comme un obstacle (voir la section 2.5.3). Cette fois-ci, le déplacement du véhicule n'est pas parallèle aux parois, et les fonctions sous-échantillonnage, filtrage et érosion n'éliminent pas les traces de la paroi au complet. Pour remédier à ce problème, on calcule approximativement la partie dans l'image qui doit correspondre au profil de paroi. Ce calcul est réalisé en utilisant la position et l'orientation du véhicule par rapport au mur. Cette partie n'est alors pas prise en compte pour la recherche des obstacles (les détails de ce calcul ont été déjà présentés dans la section 2.5.3).

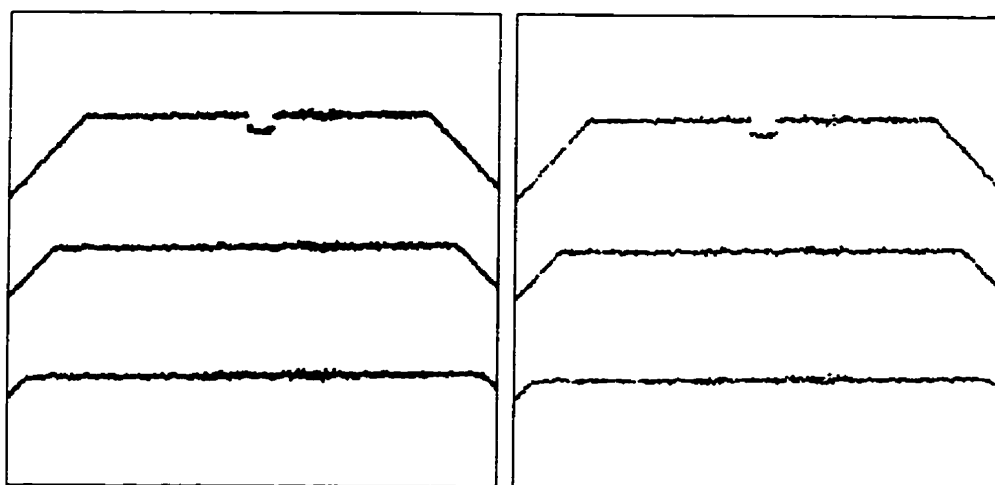
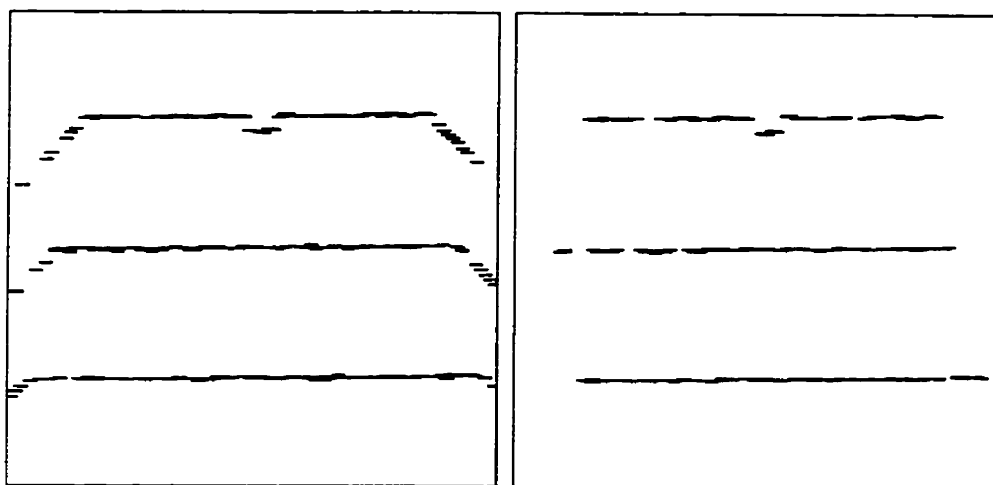
(a) Image originale I simulée(b) Image I_b après seuillage et amincissement(c) Image I_{se} après sous-échantillonnage et filtrage(d) Image I_{pt} après érosion

Figure 3.11 : Succession des étapes de traitement d'une image (Les images (c) et (d) sont agrandies pour mieux montrer les détails)

3.3 Procédure récursive du suivi de la ligne du sol

Une fois les images pré-traitées, nous cherchons à isoler la position du profil du sol dans l'image I_{pt} . Il s'agit de définir l'équation $y = a_{ij}x + b_{ij}$ de la droite D_{ij} , qui correspond au laser j dans l'image i . En ayant l'équation $y = a_{ij}(t-1)x + b_{ij}(t-1)$ de la droite $D_{ij}(t-1)$ à l'instant précédent, on cherche l'équation de la droite qui passe par les pixels blancs dans la fenêtre de largeur $2\delta_b$ (bornée par les droites $a_{ij}(t-1)x + b_{ij}(t-1) \pm \delta_b$), en minimisant l'erreur quadratique moyenne. Pour avoir une bonne estimation de $D_{ij}(t)$, cette opération est effectuée une seconde fois, δ_b étant cette fois choisi en fonction de σ_{ij} (Figure 3.12). Le choix heuristique de δ_b est

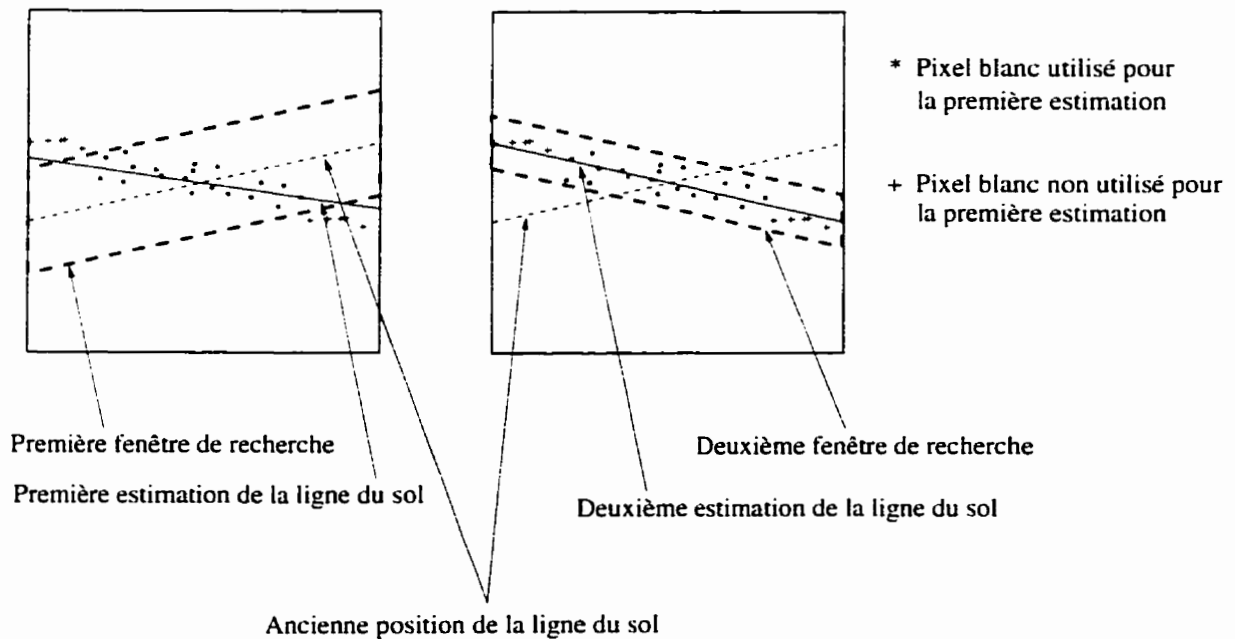


Figure 3.12 : Procédure récursive du suivi de la ligne du sol.

$\delta_b = \alpha \sigma_{ij}$ avec $2 < \alpha < 3$. De plus, à chaque ajustement, les pixels qui correspondent

aux obstacles, c'est-à-dire les pixels dans les colonnes du vecteur binaire $O_{ij}(t-1)$ qui sont égaux à 1. ne sont pas pris en considération. Le schéma-bloc du module du suivi de la ligne du sol est montré à la figure 3.13. Un critère a été fixé afin d'éliminer les fausses estimations des droites : le nombre de pixels blancs dans la fenêtre de recherche doit représenter au moins 20% de la largeur de l'image pré-traitée. Dans le cas où cette condition n'est pas remplie, les valeurs de a_{ij} et de b_{ij} sont ré-initialisées et la recherche de "nouveaux obstacles" pour cette ligne ne sera pas effectuée.

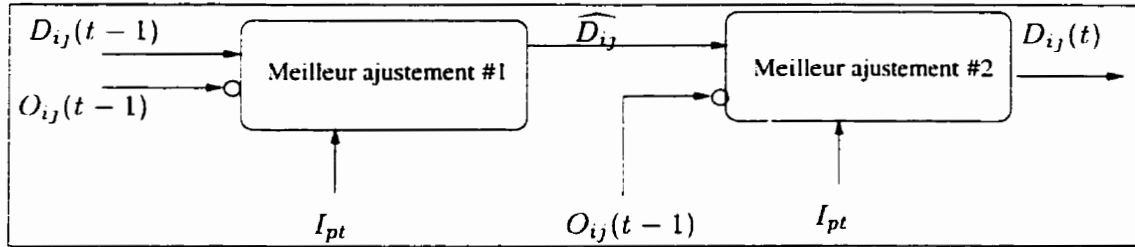


Figure 3.13 : Schéma-bloc du module du suivi de la ligne du sol.

Plusieurs exemples d'estimation de la ligne du sol sont montrés dans la figure 3.14.

3.4 Suivi d'obstacles

La partie cruciale de ce système concerne le suivi d'obstacles. Ce suivi dépend de la vitesse V du véhicule, de la position H_l et de l'angle d'orientation des lasers α_l et de la position H_c et de l'angle d'orientation α_c des caméras. En connaissant les paramètres mentionnés, la nouvelle position $y_{ij}^k(t)$ de chaque segment de ligne détaché du profil

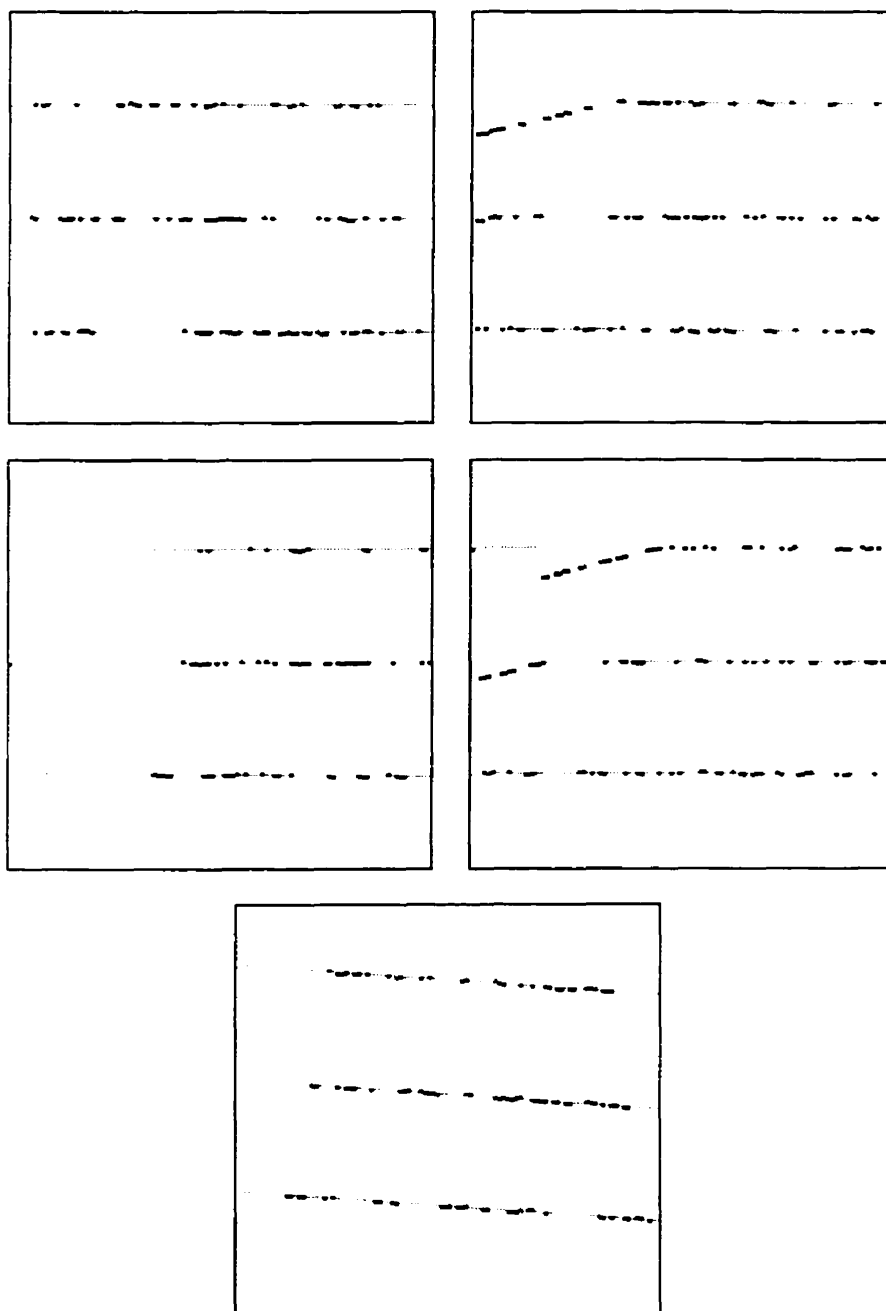


Figure 3.14 : Exemples d'estimation de la ligne du sol (les lignes claires montrent l'estimation de la ligne du sol).

du sol est détectée en fonction de sa position $y_{ij}^k(t-1)$ dans l'ancienne image. Comme la largeur et la position de l'obstacle dans l'image peuvent varier selon le déplacement du véhicule alors seule la position verticale est suivie (grâce à laquelle on peut définir la hauteur de l'obstacle).

Algorithme : Pour chaque cellule c_{ij}^k dans C_{ij} pour $k = 1 \dots n_j$ appartenant à un profil d'une image, exécuter les étapes suivantes :

1. Prédire la nouvelle position $\widehat{y_{ij}^k}(t)$ du segment détaché. La valeur de $\widehat{y_{ij}^k}(t)$ est calculée en trois étapes : d'abord, on calcule la hauteur h_{t-1} à laquelle le laser a intercepté l'obstacle dans l'ancienne itération. h_{t-1} est obtenu en remplaçant p_y par $y_{ij}^k(t-1)$ dans l'équation 2.4. Ensuite, la nouvelle hauteur h_t à laquelle le laser touche l'obstacle est obtenue en utilisant l'équation 2.7. Et enfin $\widehat{y_{ij}^k}(t)$ est calculé en remplaçant tout simplement h par h_t dans l'équation 2.6.
2. Définir une fenêtre, dans laquelle on cherche la position réelle $y_{ij}^k(t)$ du segment détaché. La taille T_f de cette fenêtre dépend de la valeur de v_{ij}^k . Si v_{ij}^k est égal à zéro, la taille de cette fenêtre est de 8 pixels, sinon ($v_{ij}^k \neq 0$) T_f est égal à 16 pixels. Nous doublons T_f si le détachement n'a pas été visible dans l'ancienne itération ($v_{ij}^k \neq 0$), car nous supposons qu'à cause des effet externes (comme la vibration du véhicule ou le passage du véhicule par-dessus une roche) la taille normale de T_f n'a pas été suffisante pour couvrir le déplacement du segment détaché. Ensuite, calculer la valeur de $y_{ij}^k(t)$ qui correspond à la moyenne de

toutes les valeurs p_y (position verticale dans le repère R_p) des pixels blancs dans cette fenêtre et prendre en compte seulement les pixels blancs qui n'appartiennent pas au profil du sol (Figure 3.15). Pour chaque pixel blanc trouvé dans la

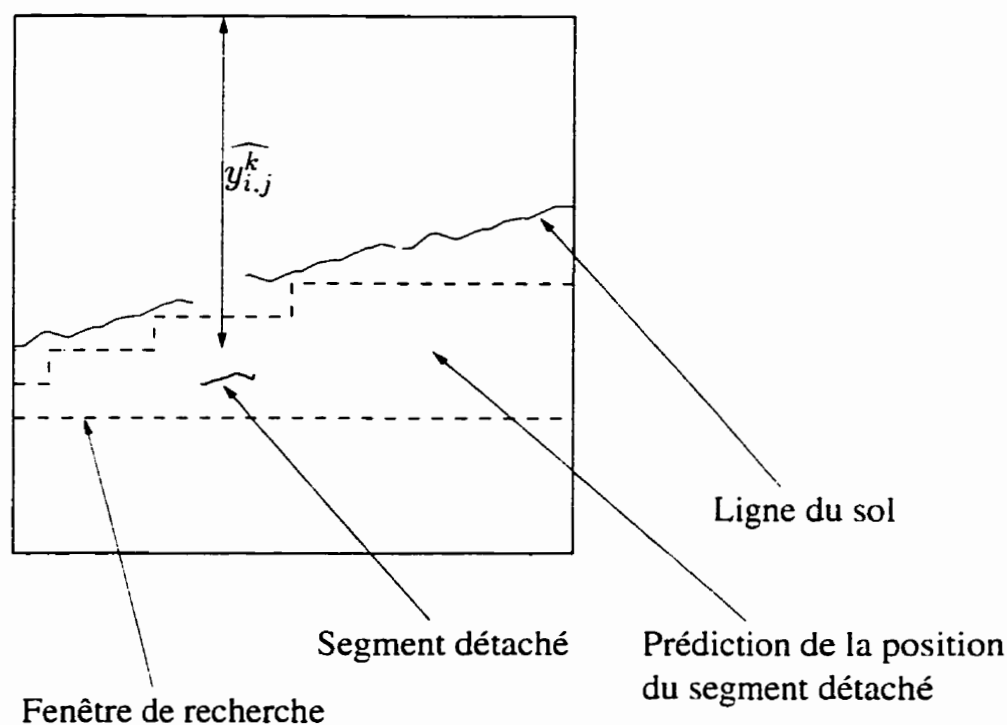


Figure 3.15 : Forme de la fenêtre de recherche pour détecter la position réelle du segment détaché.

colonne l , dans la fenêtre de recherche, assigner la valeur 1 à la colonne l dans $O_{ij}(t)$. Si $O_{ij}(t)$ n'est pas rectifié (cela veut dire que l'on a trouvé aucun pixel blanc dans la fenêtre de recherche), alors ajouter à v_{ij}^k la valeur de la distance parcourue par le véhicule depuis l'itération précédente qui est V/N_t (V la vitesse du véhicule, N_t le nombre de trames par seconde prises par la caméra).

3. Effacer la cellule c_{ij}^k si l'indice v_{ij}^k a dépassé 50 cm. Le segment détaché peut être perdu de vue pour deux raisons : lorsque le véhicule passe par-dessus une roche ou l'obstacle est petit. Dans le premier cas, lorsque la roue du véhicule dépasse la roche, si l'obstacle est suffisamment grand il est possible que le détachement réapparaisse dans image. Pour continuer le suivi, nous devons alors garder l'information sur le déplacement de ce segment détaché. Tandis que dans le deuxième cas l'obstacle ne peut plus être vu par le système et nous voulons arrêter le suivi d'obstacle.

Pour différencier ces deux cas, nous avons calculé la distance parcourue par le véhicule pour qu'une roue de rayon 75 cm passe par-dessus une roche de forme hémisphérique de rayon 10 cm, et que si après cette période un obstacle n'est toujours pas visible, nous supposons donc l'obstacle est petit et que ce ne sont pas les vibrations ou basculements du véhicule qui ont causé la disparition du segment détaché de l'image.

4. Si y_{ij}^k est égal à y_{ij}^{k+1} , nous supposons que les cellules k et $k + 1$ représentent le même obstacle, par conséquent on retire la cellule k de C_{ij} .
5. Si l'indice v_{ij}^k n'est pas égal à zéro et le véhicule est dans un virage, effectuer un "passage d'obstacles d'un sous-système à l'autre". Le passage d'obstacles d'un sous-système à l'autre est effectué lorsque le véhicule suit une trajectoire curviligne. En effet, le profil de l'obstacle bouge horizontalement dans l'image dans ce cas et peut sortir du champ de vue d'un sous-système pour entrer dans

le champ de vue d'un autre. Le premier sous-système n'a pas eu le temps de le suivre jusqu'au point critique et le deuxième sous-système ne peut plus détecter la position de l'obstacle à cause de la distance trop élevée par rapport au profil du sol car on détecte la "naissance" d'un détachement seulement dans le voisinage du profil du sol comme il a été expliqué à la section 3.5. C'est pour pallier à ce problème que nous avons implanté cette étape dans l'algorithme. Celle-ci permet la transmission des informations d'un sous-système à l'autre et la détection de l'obstacle même dans ces conditions.

3.5 Détection de nouveaux obstacles

Le but de cette fonction consiste à détecter l'apparition de nouveaux segments détachés. Le calcul de la valeur moyenne des positions verticales des pixels blancs dans la fenêtre qui se situe en dessous de la droite D_{ij} donne la position verticale du segment détaché. Il faut prendre en compte que a_{ij} n'est pas toujours égal à zéro (c'est à dire la ligne du sol dans l'image peut être inclinée), et que si des pixels blancs sont présents dans les extrémités de la fenêtre de recherche, ces pixels seront considérés comme la présence d'un seul obstacle. Pour éviter cette confusion, nous avons divisé la fenêtre de recherche en plusieurs sous-fenêtres de manière à ce que les bornes horizontales de chaque sous-fenêtre se situent à la même position dans le repère pixel R_p (Figure 3.16). Dans chaque sous-fenêtre, on effectue la recherche pour détecter les nouveaux détachements.

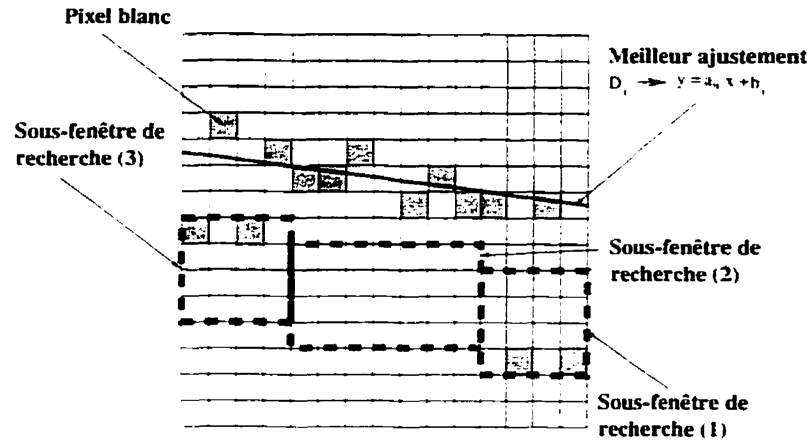


Figure 3.16 : Fenêtres de recherche pour la détection de nouveaux obstacles.

En ayant l'équation $y = a_{ij}x + b_{ij}$ de la droite D_{ij} qui approche la ligne du sol, nous procédons de la manière suivante :

1. Pour chaque colonne l dans l'image I_{pt} , nous devons calculer les deux bornes y_1^l et y_2^l de la fenêtre de recherche par :

$$\begin{cases} y_1^l = \lceil a_{ij}x_l + b_{ij} + 4 \rceil \\ y_2^l = \lceil a_{ij}x_l + b_{ij} + 8 \rceil \end{cases}$$

(la taille de la fenêtre de recherche est de 4 pixels), et si y_1^l est égal à y_1^{l-1} , nous regrouperons les colonnes l et $l - 1$ dans la même fenêtre.

2. Calculer la valeur moyenne des positions verticales des pixels blancs dans chaque sous-fenêtre et prendre en compte seulement les colonnes l dont les colonnes correspondantes dans $O_{ij}(t)$ sont égales à zéro. Et pour chaque pixel blanc dans cette sous-fenêtre, rectifier $O_{ij}(t)$. On attribuer la valeur 1 au colonne l

dans le vecteur $O_{ij}(t)$.

3. Ajouter une cellule dans la chaîne C_{ij} pour chaque rectification qui a été faite à l'étape précédente.

3.6 Décision

Après le pré-traitement des images et le suivi des segments détachés dans ces images, les neuf structures de type "Ligne" ont été passées au module de décision. Ce module peut, grâce à la connaissance des caractéristiques des trois sous-systèmes (angles d'inclinaison, angles d'orientation, et la position de chaque sous-système (H_l et H_c)) analyser alors ces informations et prendre la décision de déclencher l'alarme ou non. L'analyse est effectuée individuellement pour chacun des trois sous-systèmes (Gauche, Centre et Droite) de la manière suivante :

Dépassement de la limite : On associe une valeur appelée "Distance Minimale" ("DM") à chaque profil dans l'image. Cette valeur est calculée en utilisant l'équation 2.6. Lorsque la distance entre un segment détaché y_{ij}^k dans la "chaîne des obstacles" C_{ij} et le profil du sol est supérieure à "DM" et que la valeur de l'indice v_{ij}^k est égale à zéro, un signal d'alarme est déclenché pour ce sous-système.

Distance entre les lignes laser : L'analyse de distance entre les lignes laser dans l'image est effectuée pour détecter l'approche d'un mur ou d'un obstacle large. En

effet, le système conçu jusqu'à présent ne peut pas interpréter comme dangereux un tel événement : un éclairage du laser sur le mur (ou sur un large obstacle) produit un profil similaire à un éclairage sur le sol. On calcule donc les distances moyennes entre les profils dans l'image (trois en tout). Si un des résultats est inférieur à un certain seuil un signal d'alarme est enregistré. Ce seuil est calculé en soustrayant "DM" de la distance moyenne des deux lignes laser lorsque le véhicule est au repos.

Enfin, l'ensemble des signaux provenant des deux étapes précédentes est traité par le module comme suit :

- Un signal d'alarme émis par le sous-système de centre est considéré comme prioritaire et l'engin est immobilisé sauf si le véhicule se trouve devant une paroi et le signal que le véhicule va tourner est reçu.
- Dans le cas où le véhicule tourne ou va tourner, un signal émis par l'un des deux sous-systèmes de Gauche ou de Droite est pris en compte.

3.7 Discussion

Dans ce chapitre, l'algorithme de détection a été décrit. Le chapitre suivant va illustrer les résultats qu'un tel algorithme permet d'obtenir. Le système présenté n'utilise pas toute l'information provenant des trois images. Plusieurs éléments pourraient être utilisés pour améliorer l'efficacité du système.

Dans le chapitre précédent, nous avons mentionné la notion de "Bande de Sécu-

rité”, mais celle-ci n’apparaît à aucun endroit dans l’algorithme. Ceci est dû au fait que la largeur de la “Bande de Sécurité” a été supposée égale à la largeur de la galerie. Cela implique alors que tout objet dans la galerie vu par le système est interprété comme obstacle même si ce dernier ne se trouve pas sur le chemin du véhicule. Dès lors, en ayant une carte de l’environnement dans laquelle circule le véhicule et les mesures provenant des senseurs, il est possible de positionner le véhicule sur cette carte et donc d’analyser exclusivement les parties dans les images qui sont incluses dans la “Bande de Sécurité”.

Le deuxième élément qui pourrait améliorer l’algorithme serait de définir dans chacune des images une “région d’incertitude” pour chaque profil de laser. Dès qu’un obstacle est aperçu dans cette région, soit on ralentira le véhicule, soit on augmentera la fréquence de prise d’images. De cette manière, le nombre d’images dans lesquelles l’obstacle est aperçu est plus grand. Ainsi, le système sera plus minutieux dans sa détection lorsque la probabilité de rencontrer un obstacle devient élevée et l’influence du bruit est diminuée.

Chapitre 4

Simulation du système proposé

Ce chapitre concerne la simulation du système proposé. Tout d'abord, l'environnement dans lequel évolue le véhicule est modélisé; ensuite vient la modélisation du dit véhicule et enfin du système de détection d'obstacles. L'intégration de tous ces éléments est réalisée dans un programme de simulation numérique afin d'analyser le comportement du système.

4.1 Environnement

Il s'agit ici de créer la représentation la plus fidèle et réaliste possible d'une galerie de mine. L'environnement simulé comprend trois éléments :

- les galeries et intersections,
- le relief du sol,
- les obstacles.

4.1.1 Galeries et intersections

Une galerie est composée de deux parois verticales. L'axe de la galerie peut être rectiligne ou en arc de cercle. Une galerie peut être reliée à une autre par une intersection. Les galeries et intersections que nous avons simulées sont illustrées à la figure 4.1. Pour chaque forme de galerie ou d'intersection la position de départ du véhicule et le trajet que le véhicule doit suivre sont indiqués en pointillé.

4.1.2 Relief du sol

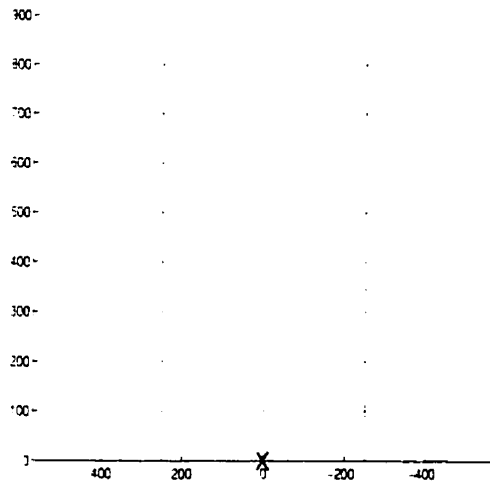
Nous avons divisé le modèle du relief du sol en deux composantes :

- une composante de fréquence relativement basse destinée à modéliser la présence de cahots ou de roches sur le parcours du véhicule.
- une composante de fréquence plus élevée modélisant la granulation naturelle du sol.

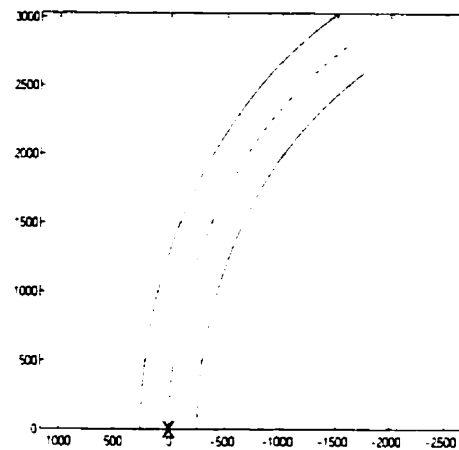
Ces deux composantes viennent altérer la hauteur de chaque roue du véhicule de façon indépendante pour chacune.

4.1.2.1 Modélisation des cahots et roches sur le parcours du véhicule

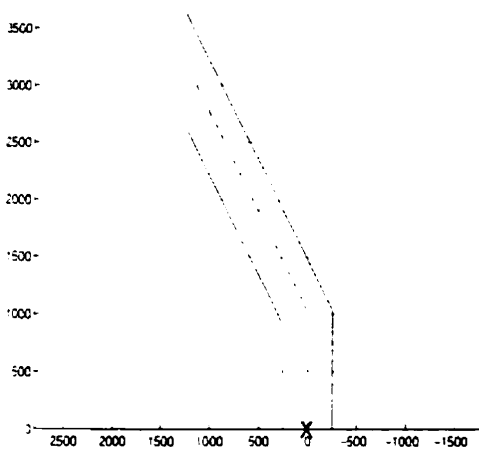
La composante basse-fréquence est modélisée comme un accident de parcours de forme hémisphérique de rayon $r = 10$ cm. Une telle taille représente un accident sévère pour une roue de véhicule typiquement de rayon $R = 75$ cm. La géométrie



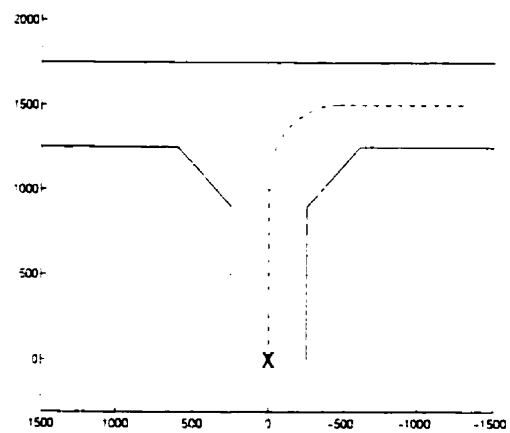
(a) Galerie rectiligne.



(b) Galerie curviligne.



(c) Intersection avec Virage.



(d) Intersection en T.

Figure 4.1 : Galeries et intersections simulées.

correspondante au passage d'une telle roue sur ce type d'accident est présentée à la figure 4.2. La trajectoire du centre de la roue ne suit pas l'hémisphère (délimité par la roche) mais plutôt un arc de cercle qui dépend des deux rayons R et r . La hauteur Δh qui s'ajoute à la roue du véhicule à chaque itération est calculée comme suit :

$$\Delta h = \sqrt{(R + r)^2 - D^2} - R.$$

où D est la distance projetée horizontalement entre le centre d'un hémisphère modélisant la roche et le centre de la roue à chaque instant. Cette composante a une influence importante sur la position des profils laser dans l'image.

4.1.2.2 Modélisation de la granularité de la route

La deuxième composante du relief consiste en une valeur aléatoire entre -1 et 1 cm sur la hauteur initiale des roues. Cette composante vient simuler la vibration mécanique du véhicule résultant de la faible composante du relief du sol.

4.1.3 Obstacles

Les obstacles sont définis soit par des demi-ellipsoïdes de dimensions variables soit par des plans verticaux. Il est possible de placer plusieurs obstacles au même endroit pour obtenir des formes irrégulières.

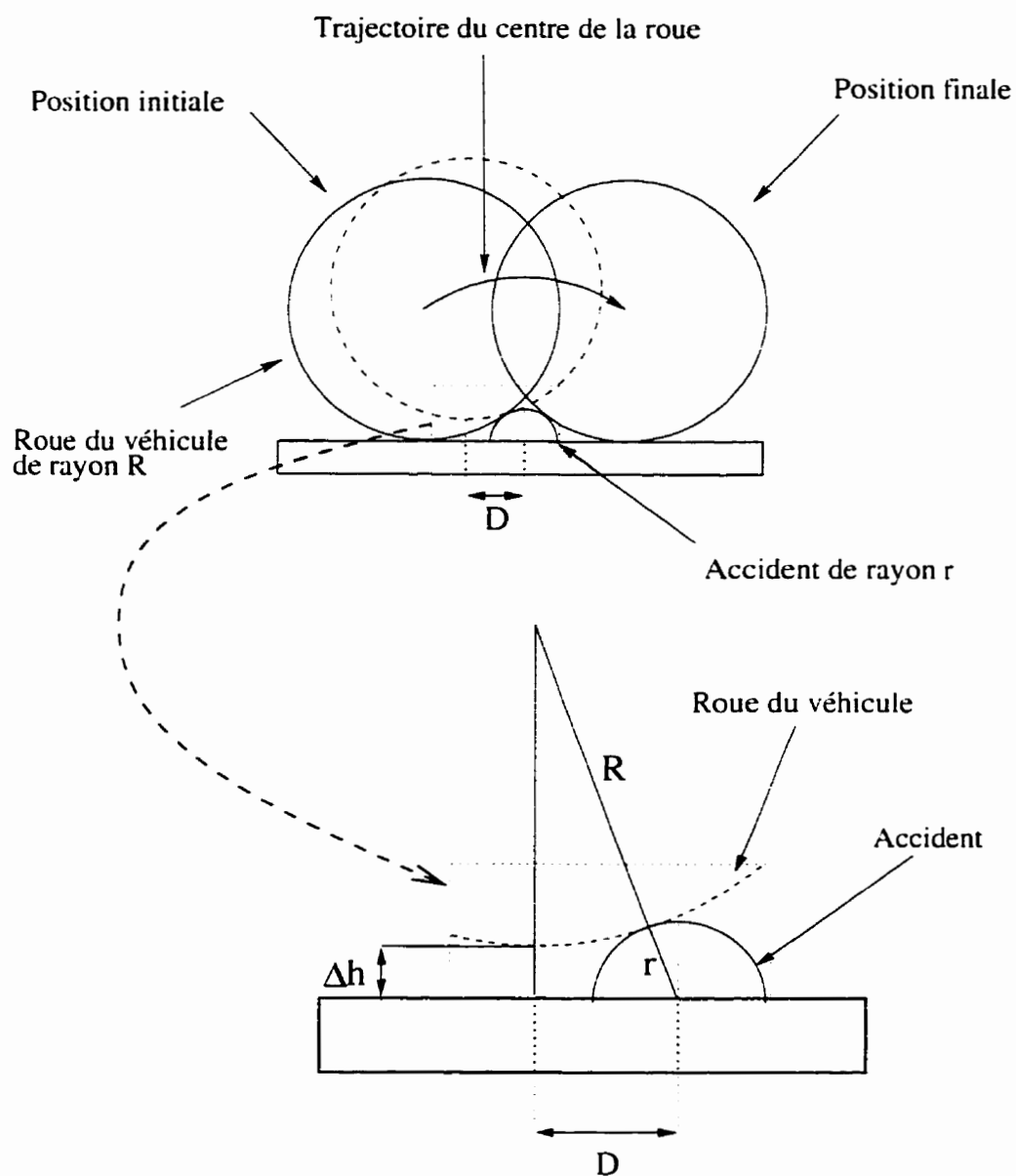


Figure 4.2 : Modélisation d'un accident sous la roue du véhicule.

4.2 Véhicule

Le modèle du véhicule utilisé est un tricycle, dont les deux roues motrices sont en avant du véhicule et la roue directrice est en arrière du véhicule (Figure 4.3).

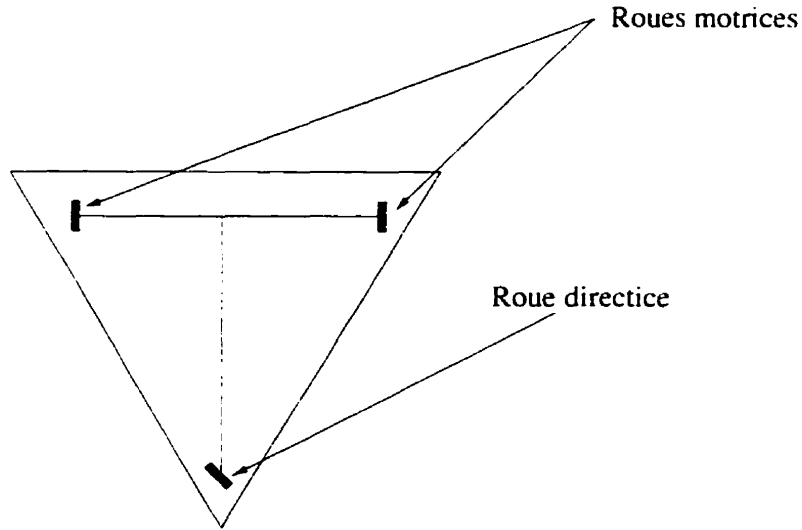


Figure 4.3 : Modèle du véhicule.

En supposant que le contact entre le sol et les pneus soit ponctuel, on définit alors les points $G = (x_G, y_G, z_G)$, $D = (x_D, y_D, z_D)$ et $Q = (x_Q, y_Q, z_Q)$ comme représentant les trois roues gauche, droite et arrière respectivement.

On définit aussi le point $A = (x_A, y_A, z_A)$ sur lequel est placé le support du système de détection d'obstacles (caméras et lasers), comme étant le centre de l'axe reliant les deux roues avant du tricycle, qui est l'origine du repère R_v et le point de référence du véhicule. L'orientation de ce support est donnée par la normale \vec{N} au plan du véhicule défini par les points G , D et Q (Figure 4.4).

La position et l'orientation instantanées du véhicule dans le repère R_r sont pré-

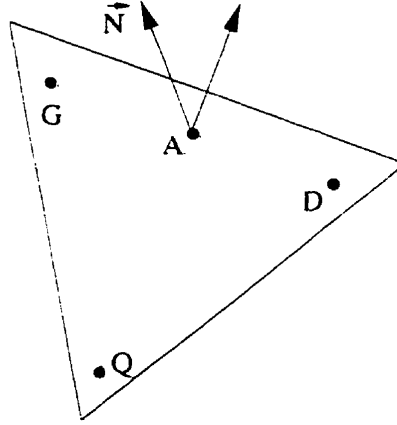


Figure 4.4 : Points de références sur le véhicule

cisées par le vecteur $\chi = (x_A, z_A, \varphi, y_G, y_D, y_Q)$. Le vecteur (x_A, z_A) indique les coordonnées de la projection de A (la position du centre des roues en avant du véhicule) dans le plan défini par (\vec{M}_X, \vec{M}_Z) du repère global R_r : (y_G, y_D, y_Q) indiquent la hauteur de chacune des trois roues par rapport au sol, et φ donne l'orientation du véhicule.

Pour obtenir les coordonnées (x_G, z_G) , (x_D, z_D) , et (x_Q, z_Q) dans le repère R_r le système suivant est utilisé :

$$\left\{ \begin{array}{l} x_G = x_A + l_V \cdot \cos(\varphi)/2 \\ z_G = z_A + l_V \cdot \sin(\varphi)/2 \\ x_D = x_A - l_V \cdot \cos(\varphi)/2 \\ z_D = z_A - l_V \cdot \sin(\varphi)/2 \\ x_Q = x_A + L_V \cdot \sin(\varphi) \\ z_Q = z_A - L_V \cdot \cos(\varphi) \end{array} \right. \quad (4.1)$$

où les symboles l_v et L_v désignent la largeur et la longueur du véhicule simulé (en réalité l_v est la distance entre les deux roues avant et L_v est la distance entre le point A et Q). Pour notre application $l_v = 162.5$ cm et $L_v = 210$ cm. Ces mesures correspondent à un véhicule minier de taille moyenne (WAGNER CO. n.d.).

À chaque itération, la hauteur de chacune des trois roues (y_G , y_D et y_Q) est initialisée à zéro, puis, ces valeurs sont ajustées selon les configurations données dans les paragraphes 4.1.2.1 et 4.1.2.2.

Une fois les coordonnées des points G , D , R définies, nous pouvons obtenir l'orientation du support du système, qui est donné par \vec{N} . Ensuite, en utilisant les transformations T_{vt} et T_{lc} définies dans la section 2.1.1, nous déduisons la position et l'orientation des lasers et des caméras dans le repère global R_r .

4.2.1 Trajet du véhicule

Dans cette section, le véhicule est représenté par le point de référence A . Le chemin que doit suivre le véhicule peut être rectiligne, circulaire ou une combinaison des deux. Le chemin étant plan, il est approché par une suite de segments de droite $S_1...S_n$ (Figure 4.5). Cette suite est déterminée par un ensemble de points $P_0...P_n$ définis dans le plan (x, z) du repère global R_r . Chaque point P_i détermine la position du véhicule (qui est la projection du point A dans le plan (x, z) du repère route) à l'instant $t = i$. La distance s entre deux points (longueur du segment S_i) est donnée par : $s = V/N_t$, où V est la vitesse du véhicule et N_t est le nombre de trames prises

par la caméra en une seconde.

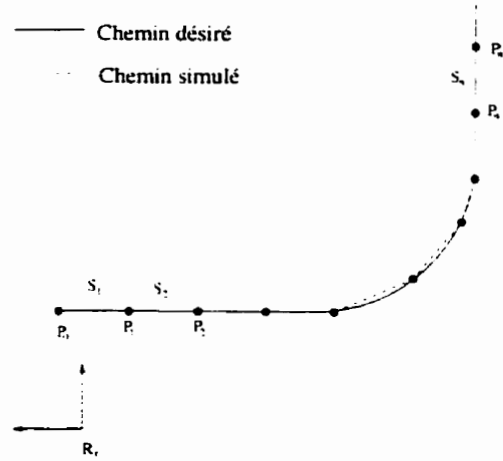


Figure 4.5 : Trajet du véhicule

L'orientation du véhicule φ_i à l'instant $t = i$ est obtenue en calculant l'angle entre les vecteurs \vec{M}_i et $\vec{P_{i-1}P_i}$. Nous définissons $\Delta\varphi_i$ comme le changement d'orientation entre les instants $i - 1$ et i . Pour un trajet rectiligne $\Delta\varphi_i = 0$ et pour un trajet en arc de cercle de rayon R : $\Delta\varphi_i = \arccos\left(1 - \frac{s^2}{2R^2}\right)$

4.3 Système de détection d'obstacles

Le système de détection d'obstacles est composé de trois modules (Figure 4.6). Chaque module est composé d'une caméra CCD et d'une diode laser qui projette trois plans laser en avant de la caméra (Figure 2.2). Les caméras sont placées de façon à pouvoir couvrir tout l'espace devant le véhicule de manière complémentaire (Figure 2.1). Conformément aux spécifications du chapitre 2, les caméras sont placées à une

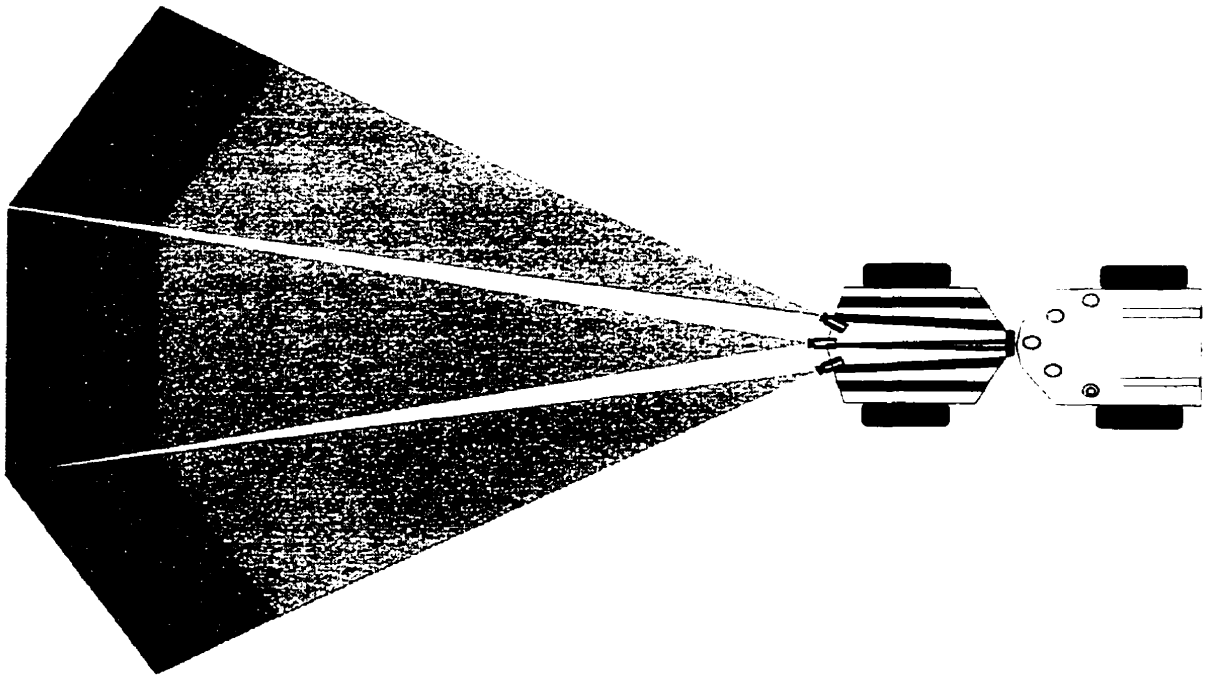


Figure 4.6 : Disposition du système proposé.

hauteur de 210 cm et les lasers à une hauteur de 160 cm par rapport au sol. Les systèmes Gauche et Droite sont orientés de -41° et 41° par rapport au centre.

4.3.1 Lasers

La modélisation des plans laser est montrée dans la section 2.1.3. L'angle d'ouverture est de 43° . Les données sont acquises à intervalles angulaires réguliers de $\delta\alpha = 0.05^\circ$. Dans chacun des trois systèmes, l'écartement angulaire entre les trois plans laser est de 1.8° et l'angle d'inclinaison du deuxième plan laser par rapport à la verticale est de 78° (voir section 2.4.1). De cette manière, le premier plan laser atteint le sol à ~ 650 cm devant le véhicule, le deuxième à ~ 750 cm et le troisième

à ~ 890 cm. Dans un cas normal où aucun basculement ne s'opère, un obstacle de 20 cm est détecté à 857 cm du véhicule par le premier plan laser, à 658 cm par le deuxième et à 570 cm par le troisième.

4.3.2 Caméras

Le modèle utilisé pour la caméra est présenté dans la section 2.1.2. Chaque point éclairé par un des plans laser est projeté dans le plan image selon le principe présenté dans la section 2.1.2. L'angle d'inclinaison de la caméra est défini de manière à ce que la projection du deuxième plan laser se trouve au centre du plan image. Les distances focales s'écrivent $f_x = 9$ mm et $f_y = 50$ mm, la distance physique entre deux pixels dans l'image est de $D_p = 0.0135$ mm et le plan d'image est une matrice de 512×512 pixels.

4.3.2.1 Modélisation des perturbations d'acquisition

L'acquisition des images des lignes laser est entachée de plusieurs types de perturbations. Certaines sont engendrées par les fluctuations géométriques des portions de scène observées, d'autres sont engendrées par le bruit interne des dispositifs d'acquisition. Dans le but de représenter globalement l'effet de ces perturbations, les objets de la scène (parois, sol) sont déplacés avant de calculer les coordonnées des points de d'intersection entre les rayons laser et ces objets. Chaque objet est déplacé en direction du vecteur normal de sa surface (le sol selon l'axe des y et les parois selon

des axes x et ou z). La valeur Pos_i de cette déviation à chaque itération est donnée par le système suivant :

$$\begin{cases} Pos_0 = A * (2 * Rand(.) - 1) \\ Pos_i = Pos_{i-1} * \alpha + A * (2 * Rand(.) - 1) * \beta \\ \alpha + \beta = 1 \end{cases} \quad (4.2)$$

où la fonction $Rand(.)$ donne une valeur aléatoire se situant entre 0 et 1. A est l'amplitude de la déviation désirée. Dans notre application, $\alpha = 0.9$ et en prenant en considération les valeurs choisies pour la hauteur minimale h_{min} des obstacles à détecter et la valeur choisie pour le cahot placé sous les roues (10 cm), nous avons choisi $A = 5$ cm.

4.4 Tests et résultats

Nous avons choisi sept "scénarios" dans lesquels le système a été testé, et dans chaque scénario une série de 750 tests a été réalisée. Dans chaque cas, le véhicule s'est déplacé selon une trajectoire qui l'a conduit vers un obstacle placé aléatoirement devant lui. Les scénarios se différencient selon la forme de la galerie et la largeur de l'obstacle. La hauteur de l'obstacle varie de façon aléatoire entre 10 et 25 cm (50 tests ont été réalisés pour chaque intervalle de 1 cm). La première série de tests est effectuée dans le cas où le véhicule se trouve dans un espace libre. Les trois autres groupes de tests ont été effectués dans le cas où le véhicule se trouve dans une galerie rectiligne

(Figure 4.1(a)). La galerie curviligne (Figure 4.1(b)) est utilisée pour la cinquième série de tests. Dans la sixième série de tests, nous analysons une situation de virage brusque qui correspond à une galerie ayant une forme en angle (Figure 4.1(c)) (un changement brusque survient dans la direction de l'axe de la galerie). Enfin, une intersection en T (Figure 4.1(d)) est étudiée dans la septième série de tests. Dans tous les cas étudiés, la hauteur minimale h_{min} des obstacles que l'on cherche à détecter est fixée à 21 cm. Cette hauteur minimum correspond approximativement à une limite à partir de laquelle l'obstacle doit absolument être détecté (taux de détection voisin de 100%). pour un obstacle de hauteur inférieure à $h_{amb} = 16$ cm, on désire un taux de détection proche de 0%, tandis qu'entre h_{amb} et h_{min} , le taux de détection n'a pas d'importance particulière.

Dans le but de caractériser la distribution du taux de détection, nous introduisons trois mesures de performance reliées respectivement aux trois régions importantes de la distribution. En dénotant par ND_h le nombre de cas où l'obstacle de hauteur h est détecté et par N_h le nombre de cas analysés à cette hauteur (dans notre application $N_h = 50$ pour toutes les hauteurs h), ces trois mesures sont :

- Le taux de fausses alarmes

$$\tau_{FA} = \frac{\sum_{h=10}^{15 \text{ cm}} ND_h}{\sum_{h=10}^{15 \text{ cm}} N_h} \quad (4.3)$$

- Le taux de manque

$$\tau_M = \max_{h \geq 21 \text{ cm}} \left(1 - \frac{ND_h}{N_h} \right) \quad (4.4)$$

- L'index d'ambiguïté

$$\tau_A = \frac{\sum_{h=16}^{20 \text{ cm}} (21 - h) \cdot ND_h}{\sum_{h=16}^{20 \text{ cm}} (21 - h)} \quad (4.5)$$

Cette dernière mesure, située entre 0 et 1, fournit une indication de l'écart entre les résultats obtenus et une situation idéale dans laquelle le taux de détection resterait nul entre les hauteurs $h_{amb} = 16 \text{ cm}$ et $h_{min} = 21 \text{ cm}$.

Dans les prochains paragraphes, les résultats des tests seront passés en revue et chaque cas sera discuté en détails.

Cas 1 : Espace libre, terrain non-accidenté, obstacle étroit.

Le premier cas est celui d'un obstacle modélisé par un demi-ellipsoïde avec une base circulaire de rayon 20 cm et de hauteur variable, placé aléatoirement devant le véhicule à une distance de 9 m. Le véhicule est placé dans un espace libre (c'est-à-dire sans parois) et se dirige vers l'obstacle à une vitesse constante de l'ordre de 4.5 m par seconde. Le terrain sous les roues du véhicule n'a pas d'accident. Les résultats des tests sont présentés à la figure 4.7 sous la forme d'un histogramme illustrant le taux de détection en fonction de la hauteur de l'obstacle. Dans la même figure, on présente les trois mesures de performance τ_M , τ_{FA} et τ_A (ces mesures vont être utilisées comme une base de référence pour les cas à venir).

Dans ce cas, nous avons un taux de manque τ_M qui est égal à 0.02; un index d'ambiguïté τ_A qui est égal à 0.05; et un taux de fausses détections τ_{FA} qui est égal

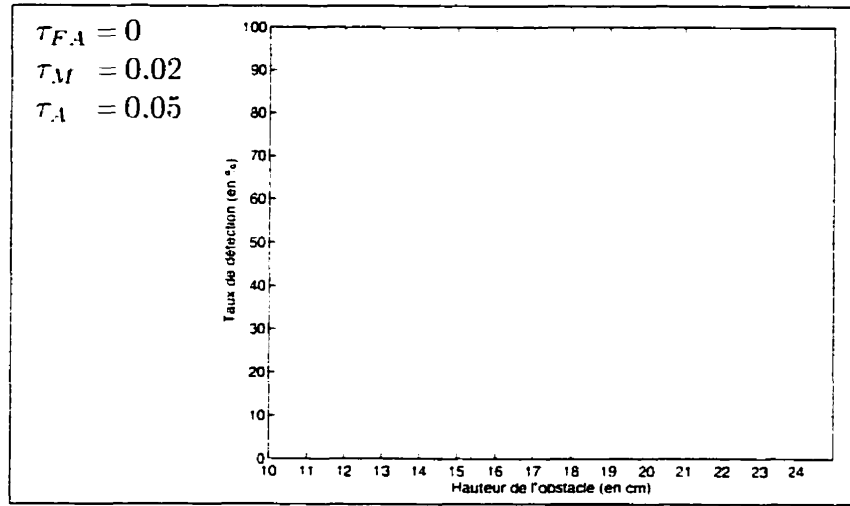


Figure 4.7 : Taux de détection (Cas 1 : espace libre, terrain non-accidenté, obstacle étroit).

à zéro. Le taux élevé de fausses détections pour les obstacles ayant une hauteur entre 19 et 21 cm, s'explique par le fort degré d'inclinaison du laser ($\alpha_l = 80^\circ$) ainsi que par la grande distance à laquelle la lumière est projetée en avant du véhicule ($L = 9$ m). L'addition d'un degré à α_l (causé pas les vibrations du véhicule) fait augmenter L d'un mètre, alors que la ligne laser sur l'obstacle est déplacée de quelques centimètres. Le mouvement de la ligne laser sur le sol peut se traduire par des déplacements de 5 à 10 pixels dans l'image tandis que le changement de la position du laser sur l'obstacle se traduira par un déplacement 1 ou 2 pixels. Si la hauteur de l'obstacle est proche de h_{min} , alors en raison du déplacement important de la ligne laser sur le sol, la distance entre le profil du sol et le segment détaché dans l'image peut dépasser la distance de danger "DM".

Cas 2.a : Galerie rectiligne, terrain non-accidenté, obstacle étroit.

Dans la deuxième série de tests, le véhicule est placé approximativement au début d'une galerie droite (Figure 4.8). et celui-ci suit une trajectoire parallèle à l'axe central de la galerie. La forme de l'obstacle et les conditions de la route sont identiques à

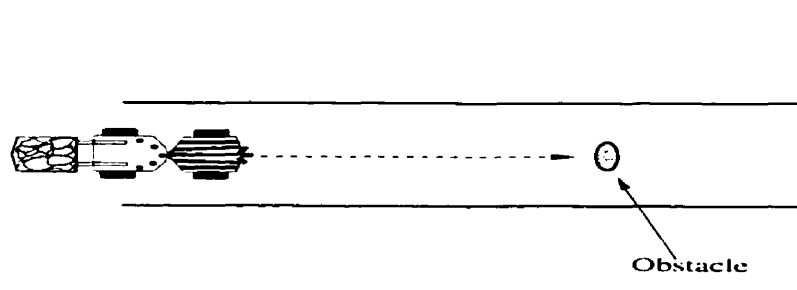


Figure 4.8 : Position du véhicule et de l'obstacle dans une galerie rectiligne (Cas 2)

ce qui été présenté dans le cas 1. L'histogramme des résultats est montré dans la figure 4.9. Dans ce cas-ci, nous avons un meilleur taux de manque τ_M par rapport au premier cas (qui est égal à zéro, c'est-à-dire 100% de détection pour les obstacles supérieurs à 21 cm), par contre le taux de fausses détections τ_{FA} est guère plus élevé que dans le premier cas (qui est égal à 0.01). Ceci peut s'expliquer par le fait que le véhicule se trouve dans une galerie, et que dans certains cas, le profil des parois pourra être interprété comme la présence d'un obstacle.

Cas 2.b : Galerie rectiligne, terrain non-accidenté, large obstacle.

Dans ce cas, l'obstacle est constitué d'un plan vertical ayant une largeur égale à 5 m, occupant ainsi toute la largeur de la galerie. Les résultats sont illustrés à la figure

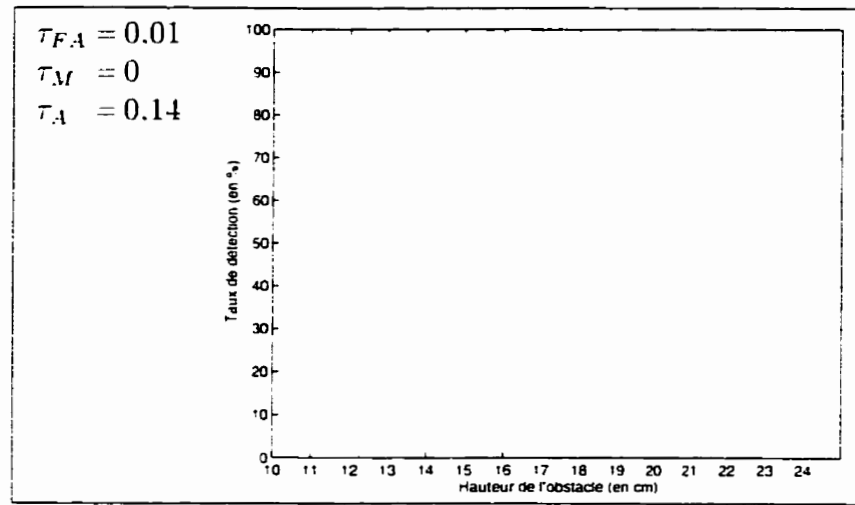


Figure 4.9 : Taux de détection (Cas 2.a : galerie rectiligne, terrain non-accidenté, obstacle étroit).

4.10. On remarque que le taux de manque est 0.06, par contre l'index d'ambiguïté

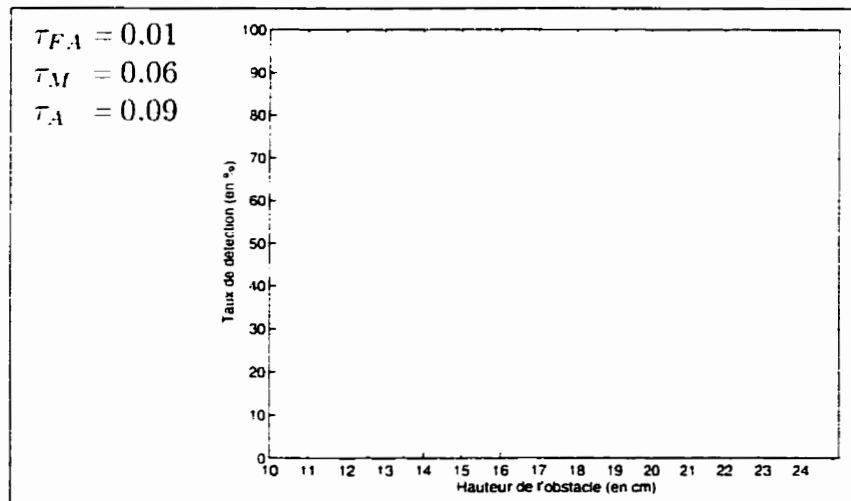


Figure 4.10 : Taux de détection (Cas 2.b : galerie rectiligne, terrain non-accidenté, obstacle large)

a comme valeur 0,09 (par rapport au taux de 0,14 mentionné dans cas 2.a). Le changement dans les résultats peut s'expliquer par le fait qu'une autre méthode est

utilisée pour détecter les obstacles larges.

En effet, comme il a été expliqué dans la section 2.3.2, dans le cas d'un obstacle étroit nous cherchons d'abord à localiser des nouveaux détachements de profil du sol, pour être capable ensuite de suivre leurs évolutions dans l'image. Le profil d'un obstacle large est alors interprété par le système comme le profil du sol et la méthode utilisée doit donc être changée. L'algorithme modifié consiste à vérifier constamment la distance moyenne entre deux lignes laser dans l'image, afin de déclencher l'alarme au cas où la distance entre les deux profils est plus petite qu'un certain seuil (voir section 2.3.2.4).

Cas 2.c : Galerie rectiligne, terrain accidenté, obstacle étroit.

Pour examiner la fiabilité du système, nous nous sommes placés dans des conditions plus complexes. Dans ce cas-ci, un accident de parcours ayant une hauteur de 10 cm est placé sous une des roues à l'avant du véhicule. La forme de l'obstacle utilisé est la même que celle dans le cas 1. L'histogramme montré dans la figure 4.11 présente les résultats de cette série de tests. On remarque une baisse considérable dans les fausses détections pour les obstacles plus petits que 21 cm (l'index d'ambiguïté est égal à 0.06). Par contre, nous avons un taux de manque plus élevé qui est égal à 0.26.

Cette diminution dans la performance provient du changement important de l'angle d'inclinaison du système. Ce changement se produit instantanément (d'une trame

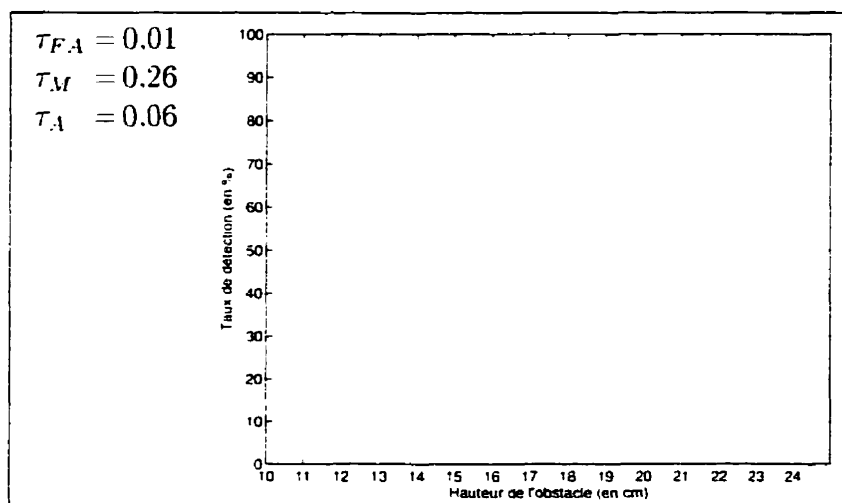


Figure 4.11 : Taux de détection (Cas 2.c : galerie rectiligne, terrain accidenté, obstacle étroit).

à l'autre). Comme il a été démontré auparavant, une faible augmentation de l'angle d'inclinaison du système fait déplacer la ligne laser sur l'obstacle de plusieurs centimètres. Dans cette série de tests, l'angle d'inclinaison du système peut augmenter jusqu'à 5 degrés, il devient alors possible que le plan laser passe par-dessus l'obstacle et donc que celui-ci ne soit plus visible. Dans la figure 4.12 on montre une série consécutive d'images lorsque le véhicule passe sur l'accident de parcours. Dans ces images, on remarque le déplacement rapide du profil du sol ainsi que l'apparition de l'obstacle et sa disparition (segment détaché) (Figures 4.12.(a,b et c)), pour se manifester dans un autre profil (Figures 4.12.(d, e et f)). Lorsque la roue du véhicule a dépassé l'accident, le détachement réapparaît dans le voisinage du premier profil (Figures 4.12.(g et h)).

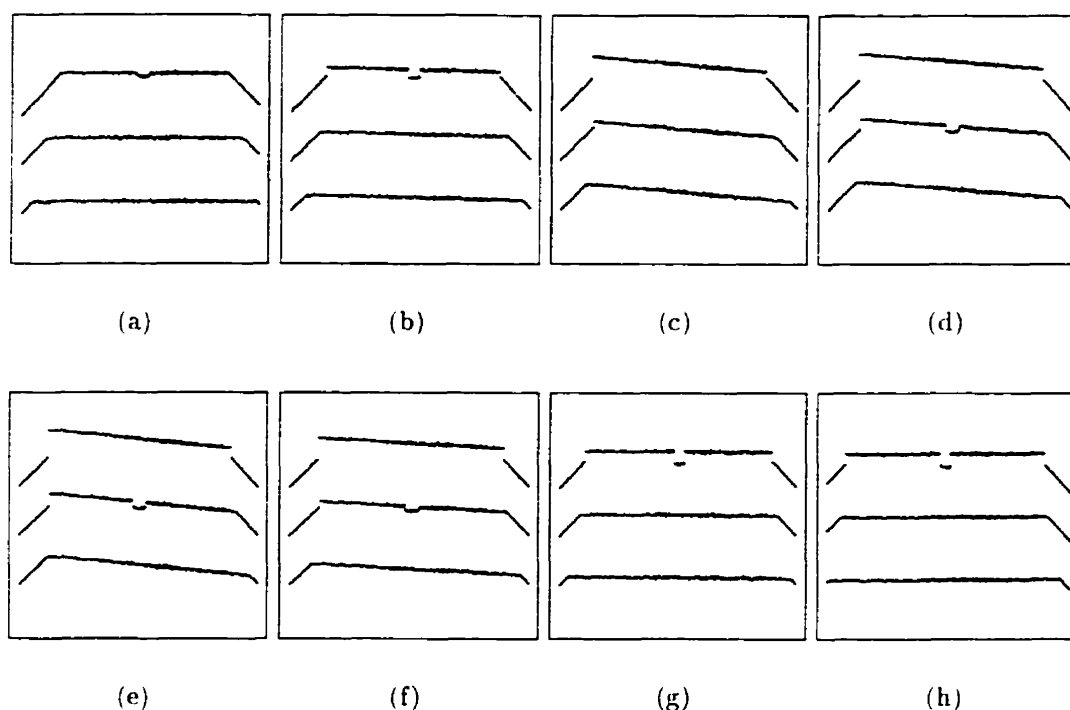


Figure 4.12 : Série d'images consécutives dans le cas où le véhicule passe sur un accident de terrain (Cas 2.c).

Cas 3.a : Galerie curviligne, terrain non-accidenté, obstacle étroit.

Dans cet exemple, nous avons testé l'influence de la forme de la galerie sur la qualité de fonctionnement du système. L'axe central de la galerie est ici un arc de cercle de rayon 30 m (Figure 4.13). Les résultats sont illustrés à figure 4.14. Nous remarquons une hausse importante du taux de fausses alarmes. Ceci est dû au fait que le véhicule n'étant plus parallèle aux parois de la galerie, le pré-traitement de l'image (surtout la fonction d'érosion) ne réussit pas à éliminer la portion correspondant aux profils des parois. Dans certains cas, ces portions pourront être interprétées comme

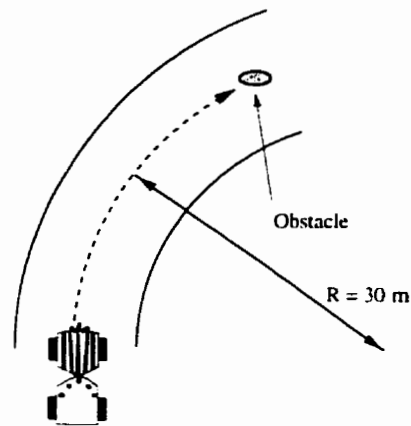


Figure 4.13 : Position du véhicule et de l'obstacle dans une galerie curviligne (Cas 3.a).

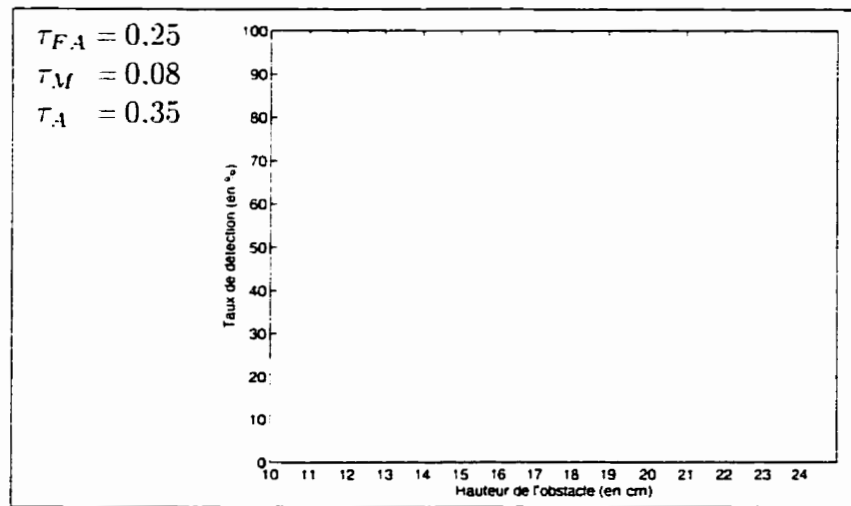


Figure 4.14 : Taux de détection (Cas 3.a : galerie curviligne, terrain non-accidenté, obstacle étroit).

correspondant à un obstacle. La figure 4.15 illustre une série consécutive d'images lorsque le véhicule se trouve dans une galerie curviligne.

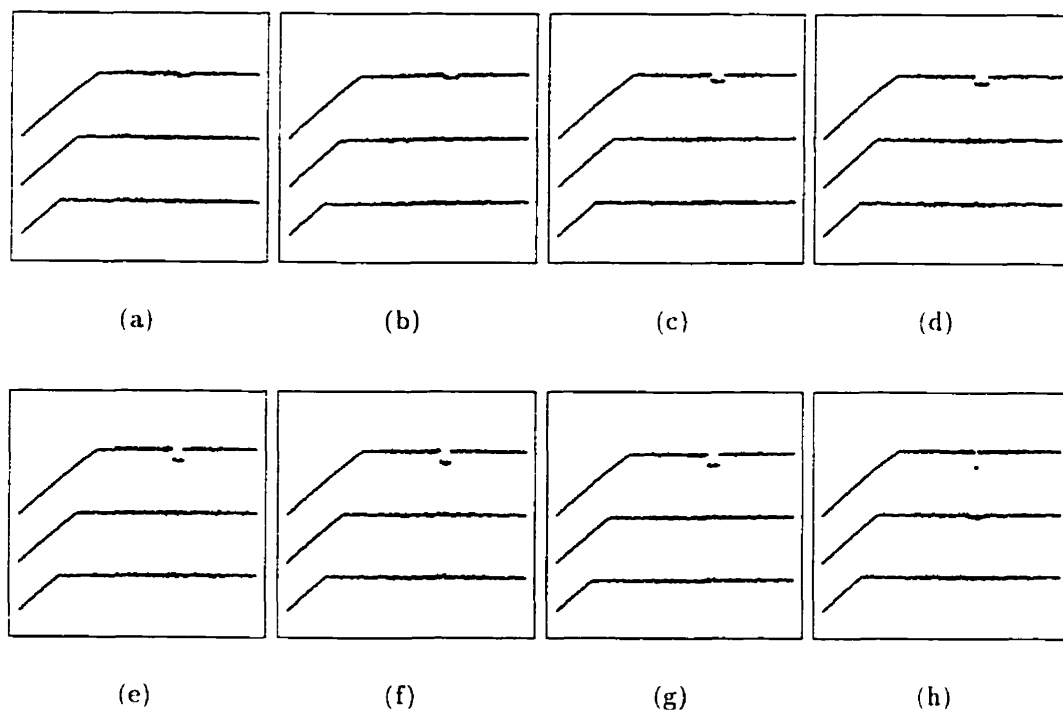


Figure 4.15 : Série d'images consécutives lorsque le véhicule se trouve dans une galerie curviligne.

Cas 3.b : Virage, passage d'information d'un sous-système à l'autre.

Dans le cas de galeries curvilignes de faible rayon de courbure ou dans le cas d'un virage, aucun des trois sous-systèmes ne peut se permettre à lui seul de suivre un obstacle, depuis son apparition jusqu'au déclenchement de l'alarme. L'évolution temporelle des segments détachés correspondant à un même obstacle est alors distribuée sur deux sous-systèmes et une coopération entre ces derniers est prépondérante (voir section 3.4). Effectivement, l'effet important à tester est le passage d'informations entre les sous-systèmes. Ceci consiste à mettre le système dans une situation où un

sous-système (par exemple, celui du gauche) a détecté un détachement mais ne peut pas suivre son évolution jusqu'au point critique car l'obstacle sort de son champ de vue pour entrer dans celui d'un autre sous-système (dans ce cas-ci, celui du centre). Dès lors, la position du segment détaché est transférée à un autre sous-système (celui du centre) pour que celui-ci puisse suivre l'évolution du segment détaché jusqu'au point critique.

Dans la figure 4.16, le passage d'un obstacle de champ de vue du sous-système du gauche au sous-système du centre est montré. Pour la mise en oeuvre de ce scénario, nous avons utilisé une intersection comportant un virage comme illustré à la figure 4.17. L'histogramme de la figure 4.18 montre une augmentation importante dans le taux de fausses détections concernant les obstacles inférieurs à 16 cm (par rapport au cas 1). Mais, l'ensemble des résultats obtenus pour les obstacles supérieurs à 21 cm est comparable aux résultats obtenus dans le cas 2.a.

Cas 4 : Intersection en "T", terrain non-accidenté, obstacle étroit.

La dernière série de tests est effectuée dans une intersection en "T". Dans la figure 4.19 est illustré le scénario de cette série de tests. Dans ce cas-ci, le véhicule est placé à une distance de 9 m d'une paroi. Le chemin suivi par le véhicule est composé d'une trajectoire droite et ensuite d'une trajectoire en arc de cercle de rayon 4,5 m.

Étant donné que le véhicule s'approche d'une paroi, le sous-système du centre interprète celle-ci comme un large obstacle. Car, en réalité, il n'y a pas de différence

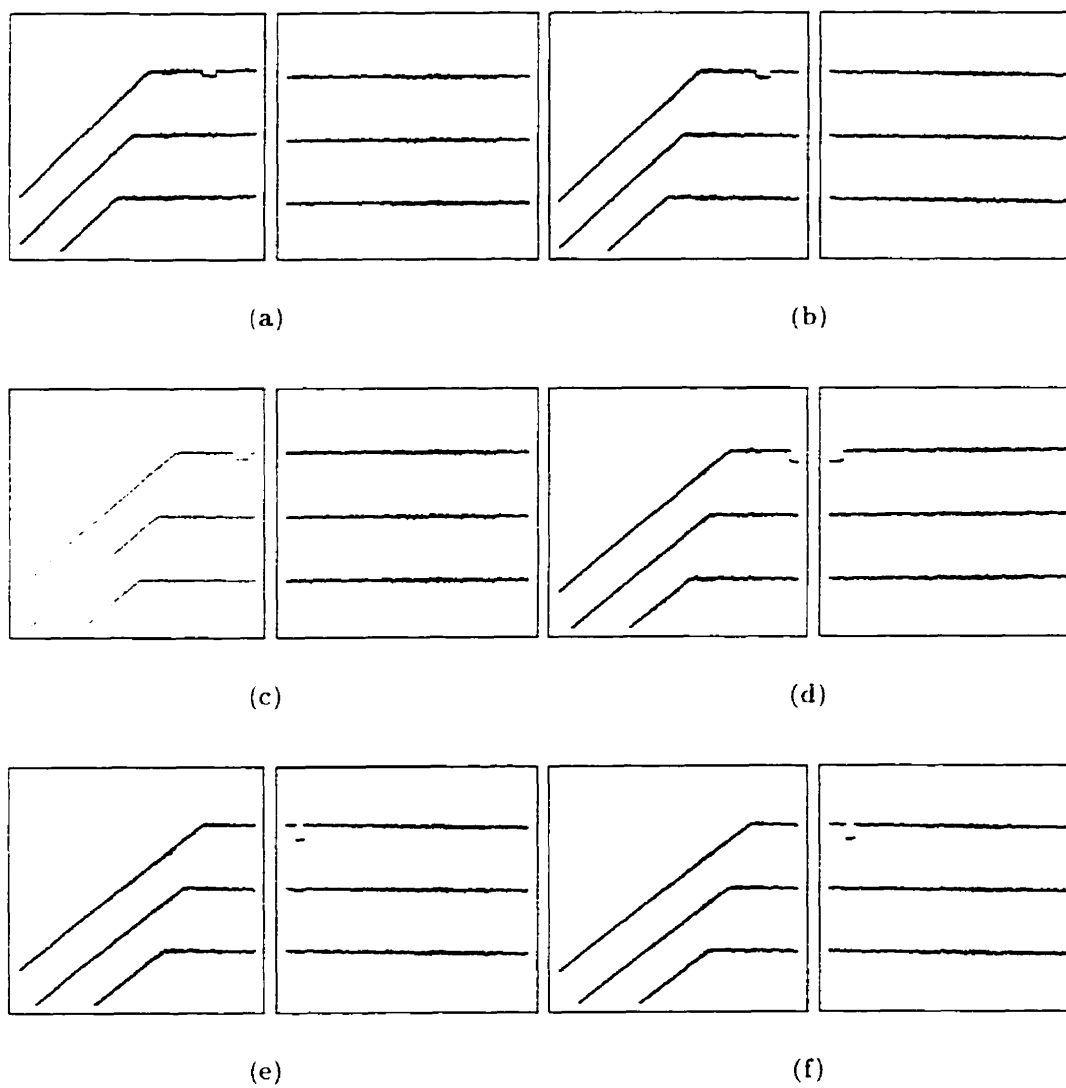


Figure 4.16 : Série d'images consécutives dans le cas où le véhicule exécute un virage important (Cas 3.b). Dans chaque bloc, l'image de gauche correspond au sous-système de gauche et celle de droite correspond au sous-système de centre.

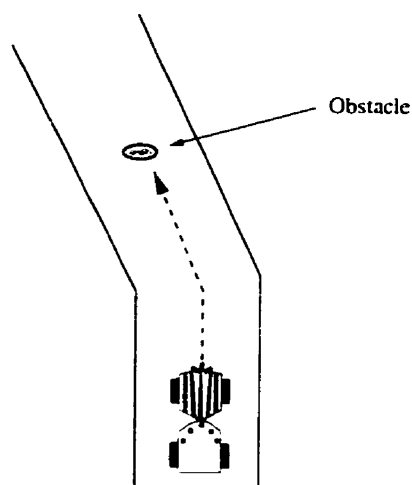


Figure 4.17 : Position du véhicule et de l'obstacle dans un virage (Cas 2.b).

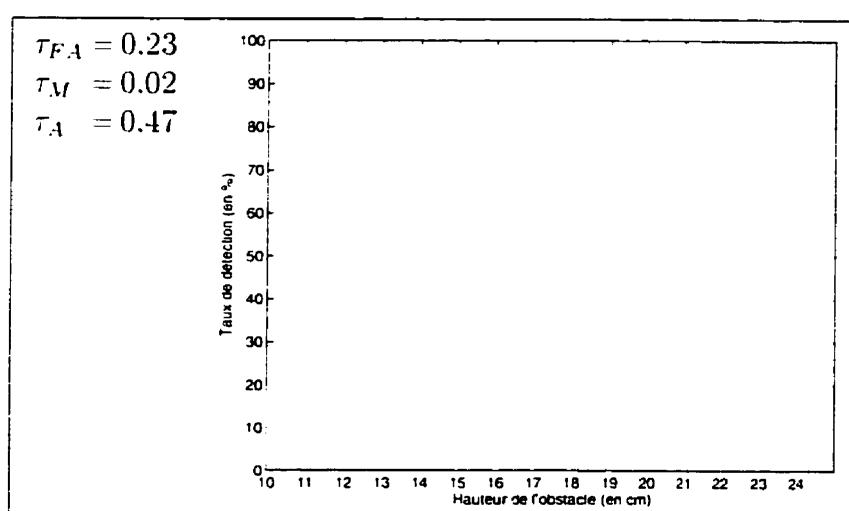


Figure 4.18 : Taux de détection (Cas 3.b : virage, passage d'information d'un sous-système à l'autre).

notable entre le profil d'une paroi et d'un large obstacle. Dans ce cas, l'alarme du sous-système du centre ne doit pas être pris en considération. De plus, l'image fournie par le sous-système de droite doit être traitée de manière particulière. Pour que l'apparence

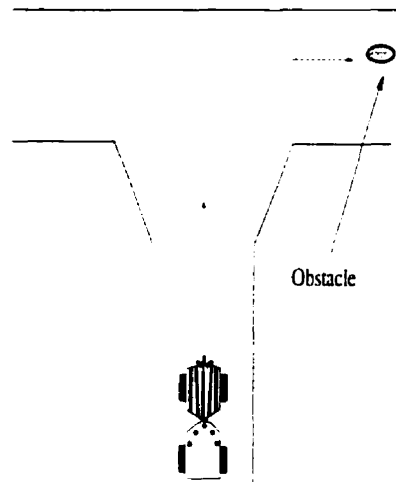


Figure 4.19 : Position du véhicule et de l'obstacle dans l'intersection en "T" (Cas 4).

de la paroi dans l'image ne soit pas traitée comme un obstacle, on doit éliminer une partie de l'image, dans laquelle la recherche de l'obstacle n'est pas effectuée (voir section 2.5.3). Dans figure 4.20, on montre une série consécutive d'images où le véhicule se trouve dans une intersection en "T" (images du sous-système de droite). Les résultats de cette série de tests sont présentés dans la figure 4.21.

En comparant les résultats dans ce cas-ci avec les résultats obtenus dans le cas 1, on peut en déduire que le taux de fausses détections est nul et on remarque aussi que le taux de manque est faible. Ceci est dû au fait que la trace des portions des parois est bien éliminée de l'image à l'aide de l'information externe (orientation et position du véhicule). Ainsi, les parois ne sont pas confondues avec les obstacles.

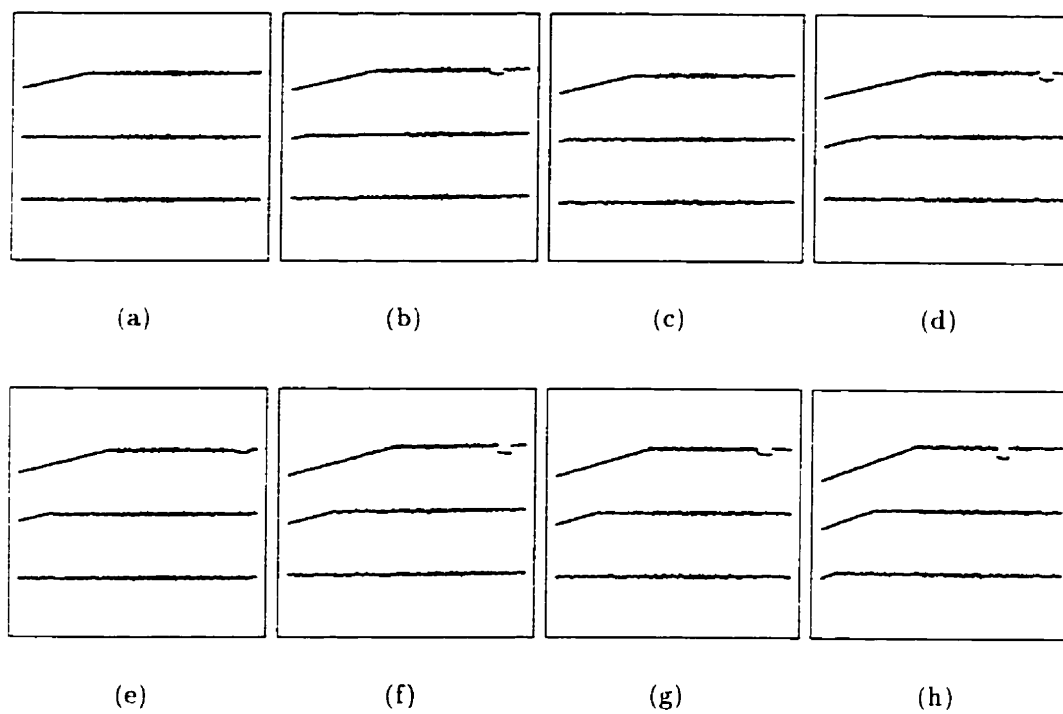


Figure 4.20 : Série d'images consécutives lorsque le véhicule se trouve dans une intersection en "T".

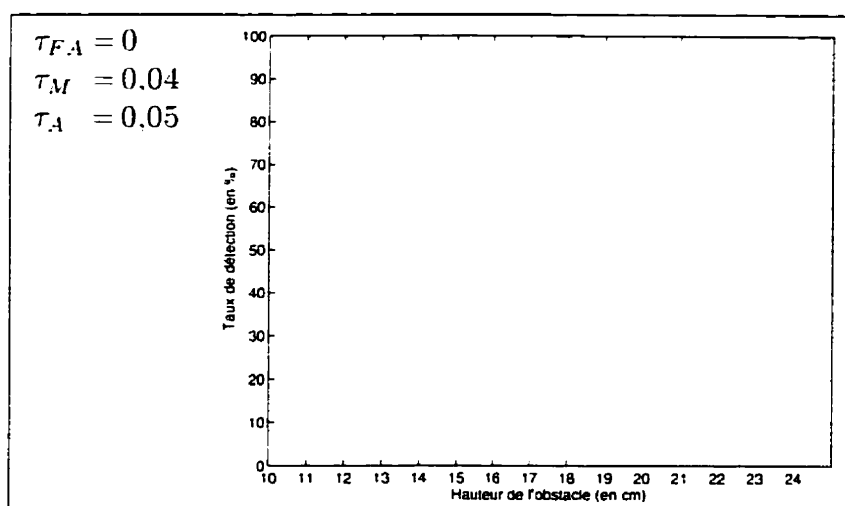


Figure 4.21 : Taux de détection (Cas 4 intersection en "T").

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons passé en revue les éléments d'une simulation et une variété de scénarios pour s'assurer de la performance et de la fiabilité du système proposé.

Dans la section 4.4, les résultats de ces tests ont été examinés et chaque cas a été discuté. Dans le tableau 4.1, un résumé de ces résultats est apporté. De plus,

Tableau 4.1 : Résumé des résultats de simulation

		$h_{min} = 21 \text{ cm}$			h_5	h_{95}
		τ_{FA}	τ_M	τ_A		
Cas 1	(espace libre)	0	0.02	0.05	18	21
Cas 2.a	(galerie rectiligne)	0.01	0	0.14	17	21
Cas 2.b	(obstacle large)	0.01	0.06	0.09	18	22
Cas 2.c	(trajet accidenté)	0.01	0.26	0.06	18	23
Cas 3.a	(trajet curviligne)	0.25	0.08	0.35	-	22
Cas 3.b	(virage brusque)	0.23	0.02	0.46	-	21
Cas 4	(intersection en "T")	0	0.04	0.05	19	21

nous avons ajouté deux autres index : h_5 , hauteur maximale correspondant à un taux de détection inférieur à 5%, et h_{95} hauteur minimale correspondant à un taux de détection supérieur à 95%.

En se basant seulement sur les résultats des tests dans les cas 1, 2 et 4, on constate que le taux des fausses détections est faible et le taux de manque est satisfaisant. On remarque aussi que h_5 se situe dans la plage des hauteurs de mesure d'ambiguïté (entre 16 et 21 cm).

Les résultats obtenus dans le cas 4 prouvent que l'élimination des portions des

parois de l'image est primordiale pour mettre à zéro le taux de fausses alarmes τ_{FA} . Dans les cas 2.a, 2.b et 2.c, étant donné que le trajet du véhicule est toujours parallèle aux parois de la galerie, la fonction "érosion" réussit à effacer les traces des parois de l'image, et c'est pour cette raison que nous obtenons un taux de fausses alarmes proche de zéro. Quant aux cas 3.a et 3.b, le travail d'élimination des portions des parois n'est pas bien exécuté (car le trajet du véhicule n'est plus parallèle aux parois de la galerie), nous obtenons alors des valeurs élevées pour le taux de fausses alarmes. Pour améliorer les résultats, la méthode utilisée dans le cas 4 pourrait être appliquée.

Pour l'ensemble des résultats, nous constatons que le système a une bonne capacité à détecter les obstacles supérieurs à 22 cm ($h_{95} < 23$). Uniquement dans le cas 2.c, où le véhicule passe par-dessus une roche, nous avons $h_{95} = 23$ (le taux de non-détection est de 4% seulement). Il faut noter que le système cherche l'obstacle dans toute la largeur d'image, il est donc prévisible que les parois de la galerie seront parfois considérées comme un obstacle, et que le taux de fausses détections augmentera ou le suivi des obstacles ne s'effectuera pas bien (le taux de manque augmentera). Un autre élément qui diminue la qualité des résultats est le niveau assez élevé de bruits introduits dans l'image par la vibration du véhicule.

Conclusion

Dans ce travail, nous avons abordé le problème de détection d'obstacles pour des véhicules circulant dans des galeries de mines souterraines. La solution proposée, bien qu'étudiée dans ce contexte, pourrait aussi servir dans d'autres types d'applications présentant des caractéristiques similaires.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté une revue générale des systèmes de vision télémétriques couramment utilisés en robotique mobile. Nous avons également décrit plusieurs systèmes de détection d'obstacles déjà proposés.

En comparant des approches existantes, nous avons justifié le choix du télémètre. Ainsi, le télémètre à lumière structurée semble être le meilleur choix grâce à sa performance, son coût peu élevé, sa robustesse et son adaptabilité à l'environnement minier.

Dans le deuxième chapitre, nous avons montré qu'il est possible d'avoir un système pour la détection d'obstacles qui se base sur l'information provenant des profils laser dans l'image seulement, en évitant la reconstruction 3D de la scène. Le phénomène exploité est le suivi temporel (d'une image à l'autre) des segments détachés (corre-

spondant à la présence d'obstacles) du profil du sol. Les propriétés géométriques du senseur et de l'environnement nous ont obligé à tripler le système pour augmenter son champ de vue. On a aussi proposé une méthode pour définir la forme des parois dans un virage afin d'éviter une occlusion.

Dans le troisième chapitre, nous avons détaillé l'algorithme d'analyse d'images ainsi que la prise de décision dans les différents cas. Les éléments essentiels de l'algorithme consistent en un pré-traitement, une procédure récursive du suivi de la ligne du sol, une fonction pour détecter les nouveaux détachements et une fonction pour le suivi temporel des segments détachés. La fonction décision déclenche l'alarme si un segment détaché s'éloigne suffisamment du profil du sol ou si la distance entre deux profils du sol est inférieure à un certain seuil. Dans le cas d'un large obstacle, étant donné que le profil obtenu masque presque entièrement la ligne du sol, un autre critère de détection est utilisé.

Enfin, dans le chapitre 4, nous avons présenté les résultats de simulation du système, impliquant la modélisation de l'environnement, la modélisation du mouvement du véhicule et du système de vision. Différents "scénarios" ont été proposés pour tester les phénomènes importants tels que l'influence du relief du sol sur l'évolution du détachement correspondant à un obstacle et la réaction du système face à un virage exécuté par un véhicule (passage d'obstacle d'un sous-système à l'autre). Les résultats obtenus sont satisfaisants.

Dans un cadre plus général, il est possible de rendre le système autonome. Jusqu'à

présent, nous avons supposé que l'information requise sur la position et l'orientation du véhicule nous était fournie par un système externe (ex. système de navigation autonome). En fait, cette information peut être extraite directement de l'image. La position des profils pourrait nous renseigner sur l'orientation du véhicule par rapport aux parois de la galerie (Flamand 1997). De plus, cette information pourrait être communiquée au système de navigation autonome pour l'aider à mieux diriger le véhicule.

Bibliographie

- ANDRESEN, F., DAVIS, L., EASTMAN, R. et KAMBHAMPATI, S. (1985). Visual algorithms for automous navigation, dans *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 856-861.
- ARAJDAL, A. (1996). Robot mobile guidé par réseau de neurons. rapport technique. GRPR.
- BARSHAN, B. et KUC, R. (1992). A bat-like sonar system for obstacle localization. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* **22**(4), 636-646.
- BAUZIL, G., CAMARGO, R. D., LEMAIRE, C. et VIALARET, G. (1991). Robot mobile hilare ii: description du materiel, rapport technique, LAAS 91234.
- BLAIS, F. et RIOUX, M. (1986). Biris: a simple 3d sensor, dans *Proceedings of the SPIE the International Society Engineering*, 235-242.
- BLAIS, F., RIOUX, M. et DOMEY, J. (1991). Optical range image acquisition for the navigation of a mobile robot, dans *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2574-2580.

- BLAIS, F., RIOUX, M., DOMEY, J. et BERARDIN, J. (1988). A very compact real time 3d range sensor for mobile robot application. dans *Proceedings of the SPIE the International Society Engineering*. 330-338.
- BORENSTEIN, J. et KOREN, Y. (1988). Obstacle avoidance with ultrasonic sensors. *IEEE journal of robotics and automation* **4**(2), 213-218.
- BORENSTEIN, J. et KOREN, Y. (1989). Real-time obstacle avoidance for fast mobile robots. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* **19**(5), 1179-1187.
- BORENSTEIN, J. et KOREN, Y. (1990). Teleautonomous guidance for mobile robots. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* **20**(6), 1437-1443.
- BORENSTEIN, J. et KOREN, Y. (1991a). Histogrammic in-motion mapping for mobile robot obstacle avoidance. *IEEE Transaction on robotics and automation* **7**(4), 535-539.
- BORENSTEIN, J. et KOREN, Y. (1991b). The vector field histogram - fast obstacle avoidance for mobile robot, *IEEE Transaction on robotics and automation* **7**(3), 278-288.
- BRASHAN, B. et KUC, R. (1990). Differentiating sonar reflections from corners and planes employing an intelligent sensor, *IEEE Transaction on pattern analysis and machine intelligence* **12**(6), 560-569.

- BROOKS. R. (1985). Visual map making for a mobile rob. dans *Proceedings. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 824-829.
- BUCHBERGER. M., JORG. K. et PUTTKAMER. E. (1993). Laserradar and sonar based world modeling and motion control for fast obstacle avoidance of the autonomous mobile robot mobot-iv. dans *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 534-540.
- BUSHNELL. L., MIRTICH. B., SAHAI. A. et SECOR. M. (1994). Off-tracking bounds for a car pulling trailers with kingpin hitching. dans *Proceedings of the 33rd Conference on decision and control*. 2944-2949.
- DAVIES. E. (1990). *Machine Vision : Theory, Algorithms, Practicalities*. Academic Press, London.
- DHOND. U. et AGGARWAL. J. (1989). Structure from stereo: A review. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* **19**(6). 1489-1510.
- DRUMHELLER. M. (1987). Mobile robot localization using sonar. *IEEE Transaction on pattern analysis and machine intelligence* **9**(2).
- DUDA. R. et HART. P. (1973). *Pattern classification and scene analyses*. John Wiley.
- DUDEK. G., FREEDMAN. P. et REKLEITIS. I. (1996). Just-in-time sensing: Efficiently combining sonar and laser range data for exploring unknown worlds. dans

- Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1422-1426.
- ELFES, A. (1987). Sonar-based real-world mapping and navigation. *IEEE journal of robotics and automation* **3**(3), 249-265.
- EVANS, J. (1991). *Visual navigation and obstacle avoidance structured light system* US Patent 5 040 116.
- FLAMAND, S. (1997). Incorporation d'un télémètre laser dans une boucle de contrôle d'un véhicule articulé. rapport technique. GRPR-RT-9711.
- HERRB, M. (1991). Vision en mouvement pour la robotique mobile. Thèse de doctorat. LASS.
- HU, G. et STOCKMAN, G. (1989). 3-d surface solution using structured light and constraint propagation. *IEEE Transaction on pattern analysis and machine intelligence* **11**(4), 390-402.
- JARVIS, R. (1983). A perspective on range finding techniques for computer vision. *IEEE Transaction on pattern analysis and machine intelligence* **5**(2), 122-139.
- KUC, R. (1990). A spatial sampling criterion for sonar obstacle detection. *IEEE Transaction on pattern analysis and machine intelligence* **12**(7), 686-690.

- KUC, R. et BRASHAN, B. (1989), Navigation vehicles through an unstructured environment with sonar, dans *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1422-1426.
- LAPERRIÈRE, Y. (1991), étude d'un système de guidage optique pour un véhicule minier articulé, Master's thesis, École polytechnique de Montréal.
- LASIRIS INC. (n.d.), *Laser diode structured light products Sales Manual*.
- LEONARD, J. et DURRANT-WHYTE, H. (1992), *Directed sonar sensing for mobile robot navigation*, Kluwer Academic Publishers, Netherlands.
- LISCANO, R. et MANZ, A. (1992), Advantages of sector elimination methods over generalized potential field methods for real-time autonomous navigation, dans *Proceedings of the IASTED International conference Control and Robotics*, 22-25.
- MANN, R., WEISBIN, C. et PIN, F. (1989), Research in mobile robotics at ornlcesar, dans *Proceedings of the IEEE international conferance on systems engineering*, 367-371.
- MATTHIES, L. et ELFES, A. (1988), Intergartion of sonar and stereo range data using a grid-based representation, dans *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 727-733.

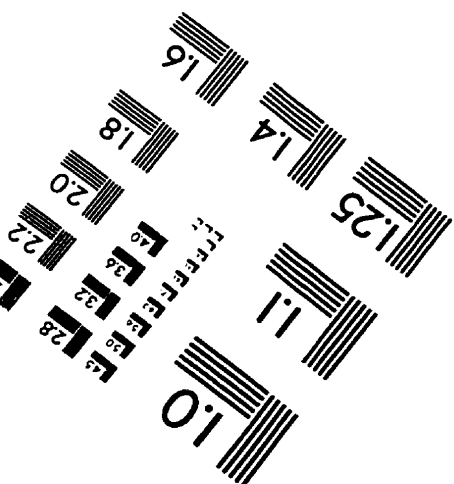
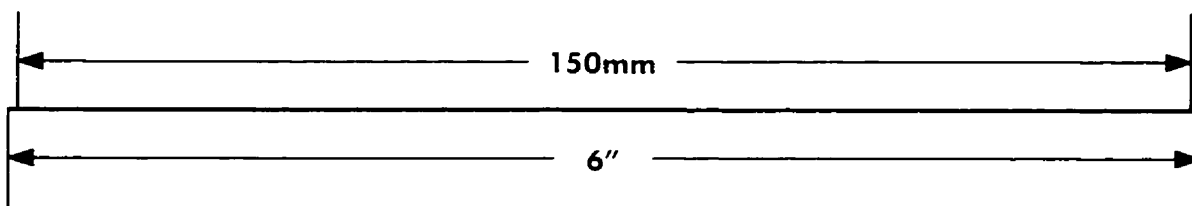
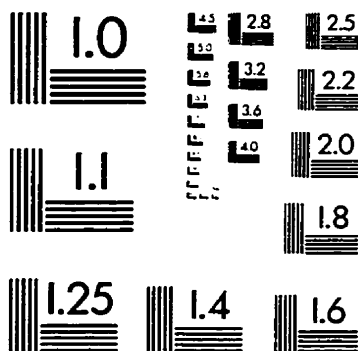
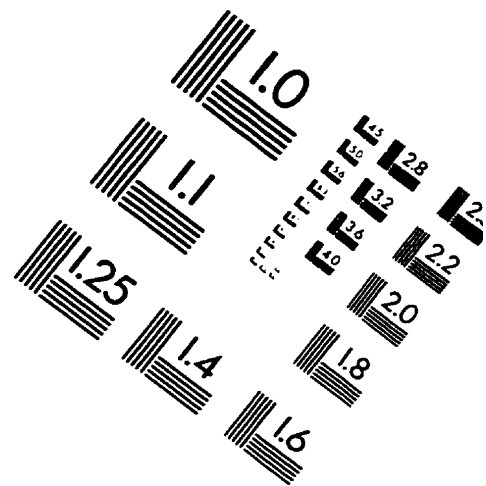
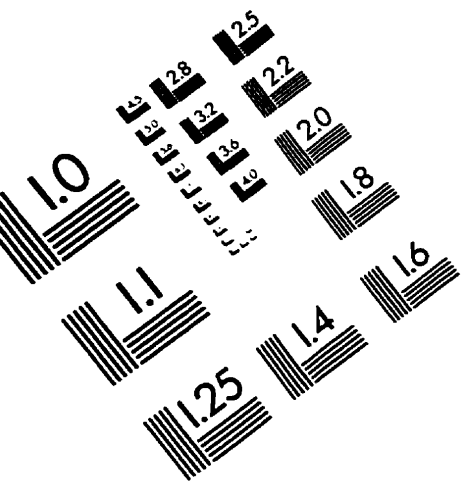
- MATTHIES, L. et GRANDJEAN, P. (1994). Stochastic performance modeling and evaluation of obstacle detectability with imaging range sensors. *IEEE journal of robotics and automation* **10**(6), 783–792.
- MIN, B., CHO, D., LEE, S. et PARK, Y. (1996). Exploration of a mobile robot based on sonar probability mapping. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* **118**, 150–7.
- MIURA, J. et SHIRAI, Y. (1994). Modeling obstacles and free spaces for a mobile robot using stereo vision with uncertainty, dans *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3368–3373.
- MOIGNE, J. L. et WAXMAN, A. (1988). Structured light patterns for robot mobility. *IEEE journal of robotics and automation* **4**(3), 541–548.
- MORAVEC, H. (1988). Sensor fusion in certainty grids for mobile robots. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* **9**(2), 61–74.
- MORAVEC, H. et ELFES, A. (1985). High resolution maps from wide angle sonar, dans *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 116–121.
- OLIVIER, J. et OZGUNER, F. (1986). A navigation algorithm for an intelligent vehicle with a laser rangefinder, dans *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1145–1150.

- PIN, F., BECKERMAN, M., SPELT, P., ROBINSON, J. et WEISBIN, C. (1989). Autonomus mobile robot research using the hermes-iii robot, dans *Proceedings IROS '89. IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems '89.*, 251-256.
- RABOISSON, S. et EVEN, G. (1990). Road extraction and obstacle detection in highway environment, dans *2nd prometheus workshop on collision avoidance.*, 74-83.
- RASCHKE, U. et BORENSTEIN, J. (1990). A comparison of grid-type map-building techniques by index of performance, dans *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation.*, 1828-1832.
- REGENSBURGER, U. et GRAEFE, V. (1994). Visual recognition of obstacles on roads, dans *Proceedings IROS '94. IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems '94. Intelligence for Mechanical Systems.*, 980-987.
- REKLEITIS, I., DUDEK, G. et FREEDMAN, P. (1996). Environment exploration using just-in-time sensor fusion, *Vision Interface* **9**(2), 61-74.
- RENCKEN, W. (1994). Autonomous sonar navigation in indoor, unknown and unstructured environments, dans *Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems.*, 431-8.

- SHRIKHANDE, N. et STOCKMAN, G. (1989). Surface orientation from a projected grid. *IEEE Transaction on pattern analysis and machine intelligence* **11**(6), 650–655.
- STEELE, J., GANESH, C. et KLEVE, A. (1993). Control and scale model simulation of sensor-guided lhd mining machines. *IEEE transaction on industry applications* **29**(6), 1232–1238.
- STUCK, E., MANZ, A., GREEN, D. et ELGAZZAR, S. (1994). Map updating and path planning for real-time mobile robot navigation, dans *Proceedings IROS '94. IEEE RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems '94. Intelligence for Mechanical Systems*, 753–760.
- TILOVE, R. (1990). Local obstacle avoidance for mobile robots based on the method of artificial potentials, dans *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 566–571.
- VEATCH, P. et DAVIS, L. (1990). Efficient algorithms for obstacle detection using range data. *Computer vision, graphics, and image processing* **50**(2), 50–74.
- VUYLSTEKE, P. et OOSTERLINK, A. (1990). Range image acquisition with a single binary-encoded light pattern. *IEEE Transaction on pattern analysis and machine intelligence* **12**(2), 148–164.
- WAGNER CO. (n.d.), *Wagner Mining Equipment Co. Sales Manual*.

- WECKESSER, P., DILLMANN, R., ELBS, M. et HAMPEL, S. (1995). Multiple sensor preprocessing for high-precision navigation and environmental modeling with a mobile robot. dans *IEEE RSJ International Conference on Intelligent Robots*. 453-458.
- WEISBIN, C., BURKS, B., EINSTEIN, J., FEEZELL, R., MANGES, W. et THOMPSON, D. (1990). Hermies-iii: A step toward autonomous mobility, manipulation and perception. *Robotica* 8(4), 7-12.
- WEISBIN, C., SAUSSURE, G., EINSTEIN, J. et PIN, F. (1989). Autonomous mobile robot navigation and learning. *Computer* 3(3), 29-35.

IMAGE EVALUATION TEST TARGET (QA-3)



APPLIED IMAGE, Inc
1653 East Main Street
Rochester, NY 14609 USA
Phone: 716/482-0300
Fax: 716/288-5989

© 1993, Applied Image, Inc., All Rights Reserved

